EVOLUŢIA FIZICII
DESVOLTAREA IDEILOR DE LA PRIMELE CONCEPTE LA TEORIA RELATIVITĂŢII ŞI TEORIA CUANTELOR

DE
ALBERT EINSTEIN şi LEOPOLD INFELD

TRADUCERE DIN LIMBA ENGLEZA

®
EDITURA TEHNICA BUCUREŞTI 1957

Mulţumim tuturor acelora care au avut amabilitatea de a ne ajuta la pregătirea acestei cărţi, şi în mod special :
Profesorilor A G. Shenstone. Princeton. N. J. şi St. Loria, Lwow, Polonia pentru fotografiile planşei III.
Domnului I. N. Steinberg pentru executarea desenelor.
Dr. M. Phillips pentru citirea manuscrisului şi pentru amabilul ei ajutor.
A. E. şi L. I.

THE EVOLUTIONS OF PHYSICS
The growth of ideas from early concepts to relativity and quanta
by
ALBERT Elr^STEIN and LEOPOLD INFELD

AII rights rescnred. Albeit Einstein and Leopold Infeld Copyright, 1933

PREFAŢĂ

înainte de a începe să citiţi această carte, vă aşteptaţi, pe drept, să vi se lămurească unele chestiuni simple. Cu ce intenţie a fost scrisă şi cine este cititorul închipuit de noi căruia i se adresează ?

Este greu să se răspundă de la început în mod clar şi convingător la aceste întrebări. Ar fi mult măi uşor să se dea răspunsul, de altfel devenit inutil, la sfîrşitul cărţii. Găsim că este mai simplu să precizăm ceea ce nu pretinde a fi cartea de faţă. Nu am scris d| carte de fizică, o expunere sistematică a faptelor şi teoriilor elementare ale fizicii. Intenţia noastră a fost mai de grabă de a schiţa, în linii mari, eforturile depuse de spiritul omenesc pentru a stabili o legătură între lumea ideilor şi cea a fenomenelor. Am încercat să înfăţişăm forţele active care obligă ştiinţe să găsească idei corespunzătoare realităţii lumii noastre. Dar expunerea noastră trebuie să fie simplă. Prin labirintul faptelor şi conceptelor, a trebuit să alegem calea cea mai dreaptă care ni s-a părut cea mai caracteristică şi mai semnificativă. Faptele şi teoriile care nu se găseau pe această cale, au trebuit să fie omise. Ţinta noastră principală, ne-a silit să facem o alegere corespunzătoare a faptelor şi a teoriilor prezentate. Importanţa unei probleme nu trebuie cîntărită după numărul de pagini care îi sînt consacrate. Anumite linii esenţiale ale gîndirii au fost lăsate la o parte, nu pentru că ni s-au părut lipsite de importanţă, ci pentru că ele nu se găseau pe drumul ales.

în timpul redactării cărţii am discutat mereu între

nci asupra caracteristicilor cititorului nostru închipuit şi ne-am neliniştit mult pentru dînsul. După părerea noastră, el ar trebui să-şi compenseze, printr-un număr apreciabil de calităţi, lipsa totală de cunoştinţe concrete de fizică şi matematică. Frintre altele ni-l închipuim animat de interes pentru ideile fizice şi filosofice şi nu ne-am putut opri de a admira răbdarea cu care luptă spre a-si croi drum prin pasagiile mai puţin interesante, dar mai anevoioase. El îşi dă seama că pentru a înţelege o pagină anumită este indispensabil să fi citit cu atenţie cele pre~ cedente. El ştie că nu-i este îngăduit să citească o carte ştiinţifică ca un roman, oricît de popular ar fi scrisă.

Cartea este o discuţie fără pretenţii între dumneavoastră şi noi, chiar dacă o veţi găsi anostă sau interesantă, searbădă sau captivantă ; scopul nostru îl socotim atins de îndată ce aceste pagini vor fi reuşit să vă dea o idee despre lupta eternă purtată de spiritul creator al omului pentru înţelegerea mai adincă a legilor care guvernează fenomenele fizice.

A. E.

I. ASCENSIUNEA CONCEPŢIEI MECANICISTE

Marea poveste a tainelor naturii. — Prima idee conducătoare. — Vectorii. — Enigma mişcării. — încă o idee conducătoare. — Este căldura o substanţă ? — Montagnes russes. — Raportul de transformare. — Concepţiile filosofice. —Teoria cinetică a materiei.

§ 1. MAREA POVESTE A TAINELOR NATURII

In închipuirea noastră se conturează o poveste minunată cu intimplări ale căror împrejurări sînt tainice. A-ceste întîmplări sînt toate firele conducătoare esenţiale şi ne forţează să construim noi înşine teoria celor întîmplate. Dacă urmărim cu atenţie intriga, ajungem la soluţia completă înainte ca autorul să ne-o dezvăluie la sfîrşitul cărţii. Soluţia însăşi, contrar romanului detectiv de calitate inferioară, nu ne dezamăgeşte ; mai mult, ea apare tocmai în momentul în care am aşteptat-o.

Putem oare asimila pe cititorul unei astfel de cărţi cu oamenii de ştiinţă, care din generaţie in generaţie continuă să caute dezJegarea tainelor pe caro le conţine cartea naturii ? Comparaţia este falsă şi va trebui părăsită în cele ce urmează ; ea cuprinde, totuşi, o anumită justificare şi de aceea trebuie extinsă şi modificată astfel încît să pună într-o lumină mai justă eforturile ştiinţei de a dezlega misterul Universului.

Această mare poveste a tainelor naturii nu s-a sfîrşit. Nici nu sîntem siguri că există un sfîrşit. Dar numai citirea poveştii ne-a dezvăluit multe dintre secrete ; ea ne-a deprins să înţelegem graiul naturii, ea ne-a permis să înţelegem multe din căile de dezvoltare şi a fost un nesecat izvor de bucurii şi un imbold statornic în mersul înainte, adeseori anevoios, al ştiinţei. Dar sîntem conştienţi că cu toate volumele citite şi răstălmăcite, sîntem încă departe de soluţia finală, admiţînd că exista o astfel de soluţie. După fiecare etapă străbătută căutăm o nouă explicaţie, compatibilă cu toate datele stabilite anterior. Anumite teorii şi ipoteze au explicat o sumedenie de fapte dar nu există o soluţie compatibilă cu tot ceea ce cunoaştem despre natură. Adeseori o teorie, în aparenţă perfectă, s-a dovedit inadecvată în lumina unei noi lecturi. Fapte noi apar care o contrazic sau care nu sint explicate prin această teorie. Cu cit citim mai mult, cu atît admirăm mai din plin structura acestei cărţi, chiar dacă soluţia completă pare să se îndepărteze, pe măsură ce avansăm cu cititul.

Aproape în fiecare roman poliţist, începînd de la minunatele povestiri ale lui Conan Doyle, soseşte o dată momentul cînd detectivul şi-a strîns întregul material de fapte, necesar pentru o anumită fază a problemei sale. Aceste fapte par adesea stranii, incoerente şi fără nici o legătură între ele. Marele detectiv îşi dă seama însă, că* pentru moment, nu este nevoie să întreprindă noi investigaţii şi că numai reflexia pură va putea stabilii o corelaţie între faptele adunate. Cîntă la vioară sau se întinde în jilţ trăgînd din pipă, şi dintr-o dată — minune ! — a găsit, în adevăr, soluţia. Şi nu numai că a găsit o explicaţie pentru faptele existente, dar îşi dă seama că trebuie să se fi petrecut şi alte evenimente. Şi cum ştie acum exact unde trebuie să cerceteze, el poate porni, dacă-i place, în căutarea unor alte evenimente pentru a-şi culege noi confirmări ale teoriei sale.

Omul de ştiinţă, care citeşte cartea naturii, dacă ne este îngăduit să repetăm această frază uzată, trebuie să găsească soluţia el singur, căci el nu poate face ca cititorii nerăbdători ai altor romane, să sară la finele cărţii. In cazul nostru, cititorul este, în acelaşi timp, şi detectivul care se străduieşte să explice, cel puţin în parte, legătura dintre evenimente şi bogatul lor conţinut. Pentru a obţine numai o soluţie parţială, omul de ştiinţă trebuie să strîngă la un loc faptele neordonate, de care dis

pune, să le facă coerente şi inteligibile cu ajutorul gîn-dirii creatoare.

în paginile ce urmează, ne-am propus să descriem în linii mari acea operă a fizicienilor, ce corespunde gîn-dirii pure a cercetătorului. Ne vom ocupa în special cu, rolul pe care l-au jucat gîndirea şi ideile în urmărirea, aventuroasă a cunoaşterii lumii fizice.

§ 2. PRIMA IDEE CONDUCĂTOARE

încercările de a citi marea Carte a tainelor naturii se* împletesc cu începuturile gîndirii omeneşti. Das, abia cu aproape trei sute de ani în urmă au început oamenii de ştiinţă să descifreze limbajul cărţii. începînd de atunci, din epoca lui Galileu şi Newton, lectura a înaintat repede. S~a dezvoltat tehnica cercetării şi metodele sistematice de depistare şi urmărire a ideilor conducătoare. Unele enigme ale naturii au putut fi astfel dezlegate, deşi multe din soluţiile dobîndite s-au dovedit a fi provizorii şi superficiale, în lumina cercetărilor ulterioare.

O problemă fundamentală, care din cauza caracterului ei complicat a rămas mii de ani învăluită în negură, este cea a mişcării. Toate mişcările pe care le observăm în natură,

mişcarea pietrei aruncată în aer, a vaporului care străbate marea, a unei! căruţe împinsă pe drum, sînt în realitate foarte complicate. Pentru a putea înţelege aceste fenomene este cuminte să incepem cu cazurile cele mai simple cu putinţă, trecind apoi treptat la cazurile mai complicate. Să considerăm un corp în repaus, deci un corp în stare de nemişcare. Pentru a-i schimba poziţia este necesar să exercităm o acţiune asupra lui, împin-gîndu-1, ridicîndu-1 sau supunîndu-1 acţiunii altor corpuri, cum ar fi caii sau maşinile cu abur. Intuiţia ne sugerează o legătură între mişcare şi acţiunea de împingere, ridicare sau tragere. Experienţele repetate ne îndeamnă să riscăm afirmaţia suplimentară că pentru a-i da corpului o mişcare mai rapidă, trebuie să-1 împingem mai puternic. Pare firesc să tragem concluzia, că viteza unuîJ corp este cu atît mai mare, cu cît acţiunea, care se exercită asupra lui este mai puternică. O căruţă trasă de patru

cai merge mai repede, decît una trasă numai de doi. Intuiţia ne îndeamnă deci să spunem, că între viteză şi acţiunea exterioară este o legătură esenţială.

Cititorilor de romane poliţiste le este familiar faptul că o cale greşită complică acţiunea şi întîrzie dezlegarea cazului. Metoda de a raţiona dictată de intuiţie a fost greşită şi a condus la o concepţie falsă asupra mişcării, concepţie ce s-a menţinut totuşi secole de-a rîndul. Marea autoritate a lui Aristotel in întreaga Europă a fost poate cauza principală a încrederii persistente în această reprezentare intuitivă. In Mecanica, lucrare care se atribuie de două mii de ani lui Aristotel, putem citi :

„Corpul aflat în mişcare se opreşte cînd forţa care îl împinge îşi încetează acţiunea".

Descoperirea şi folosirea raţionamentului ştiinţific de către Galileu reprezintă una dintre cele mai importante cuceriri din istoria gindirii omeneşti şi marchează adevăratul început al fizicii. Această descoperire ne-a învăţat că nu trebuie întotdeauna să ne încredem în concluzii intuititve, bazate pe observaţii directe, căci ele ne duc, uneori, pe o cale greşită. Dar prin ce este greşită intuiţia ? Poate oare fi greşită afirmaţia că o căruţă trasă de patru cai trebuie să meargă mai repede, decît una trasă de doi cai ?

Să cerc'etăm mai îndeaproape elementele fundamentale ale mişcării, plecînd de la experienţe simple luate din viaţa de toate zilele, familiare omenirii încă de la începuturile civilizaţiei şi agonisite în lupta pentru existenţă.

Să presupunem că o persoană care împinge un cărucior pe un drum neted încetează brusc să-1 mai împingă. Căruciorul va mai parcurge o distanţă scurtă înainte de a se opri. Ne întrebăm, cum s-ar putea mări această distanţă ? Există mai multe modalităţi de a realiza aceasta, de exemplu ungînd roţile, sau netezind şi mai mult drumul. Cu cît roţile se vor roti mai uşor, cu cît drumul va fi mai neted, cu atît căruciorul va străbate o distanţă tot mai mare, înainte de a se opri. Dar ce se realizează prin ungere şi netezire ? Nimic altceva decît o micşorare a influenţelor exterioare. S-a redus ceea ce numim frecarea

roţilor cu axul precum şi frecarea dintre roţi şi drum. Explicaţia aceasta reprezintă o interpretare teoretică a faptelor observate, dar care este încă arbitrară. Dacă mai facem încă un pas esenţial am găsit adevăratul fir conducător. Să ne închipuim un drum perfect neted şi un cărucior ale cărui roţi să fie lipsite cu desăvîrşire de frecare. în aceste condiţii n-ar mai exista nimic care să oprească căruciorul, astfel că el ar trebui să-şi continue neîncetat mişcarea. La concluzia aceasta se ajunge numai reflectind asupra unei experienţe idealizate care nu poate fi niciodată realizată efectiv, întrucît este imposibil să se elimine toate influenţele exterioare. Această experienţă idealizată ne-a dat cheia care a deschis calea pe care s-au pus bazele mecanicii mişcării.

Comparînid cele două moduri de a găsi soluţia problemei, putem spune : concepţia intuitivă ne spune că cu cît este mai mare acţiunea cu atit mai mare este viteza. Viteza ne arată dacă asupra unui corp acţionează sau nu foi^e exterioare. Faptul nou descoperit de Galileu este : un corp care nu este nici împins, nici tras sau acţionat altcumva, sau pe scfurt, dacă nici o forţă exterioară nu se exercită asupra lui, acesta rămîne în repaus sau se mişcă uniform şi rectiliniu, adică cu aceeaşi viteză de-a lungul unei drepte. Asfel, viteza nu indică dacă asupra unui corp acţionează sau nu forţe exterioare. Concluzia lui Galileu, care s-a dovedit a fi cea corectă, a fost formulată, cu o generaţie mai tîrziu, de

Newton, ca lege a inerţiei. De obicei, această lege este primul lucru care se învaţă pe de rost la şcoală, şi poate unii şi-o mai amintesc :
„Orice corp îşi menţine starea de repaus sau de mişcare uniformă şi rectilinie dacă nu este obligat de către forţe exterioare să-şi schimbe această stare".
Am văzut că această lege a inerţiei nu poate fi dedusă direct din experienţă, ci numai printr-un proces de abstractizare al gindirii în concordanţă cu observaţia. O experienţă idealizată nu poate fi niciodată realizată efectiv, deşi ea conduce la o înţelegere profundă a experienţelor reale.
Din varietatea de mişcări din lumea înconjurătoare,

să alegem ca prim exemplu, mişcarea rectilinie şi uniformă. Ea este cea mai simplă deoarece nu este produs! de nici o forţă exterioară. Mişcarea rectilinie şi uniformă nu poate fi însă realizată niciodată ; o piatră aruncată dintr-un turn, un cărucior împins pe drum, nu pot niciodată să se mişte in mod riguros rectiliniu, şi uniform, deoarece nu putem elimina influenţa forţelor exterioare.
Intr-un bun roman poliţist, indicaţiile cele mai evidente duc deseori la ipoteze greşite. Tot astfel şi in cursul încercărilor noastre de a înţelege legile naturii, constatăm de asemenea că explicaţia intuitivă cea mai directă este deseori greşită.
Gîndirea omenească creează imagini mereu schimbătoare despre lume. Contribuţia lui Galileu a distrus punctul de vedere intuitiv şi 1-a înlocuit printr-unuJ nou. Acesta este sensul descoperirii lui Galileu.
Dar se naşte imediat o altă întrebare în legătură cu mişcarea. Dacă viteza nu este o indicaţie a acţiunii unor forţe exterioare care solicită corpul, care este atunci acea indicaţie ? Răspunsul la această întrebare fundamentală a fost găsit de Galileu, şi mai tîrziu a fost formulat mai concis de Newton. El constituie o nouă idee conducătoare în investigaţia noastră.
Pentru a găsi răspunsul corect, trebuie să reflectăm ceva mai profund asupra cazului cu căruciorul care înaintează pe un drum perfect neted. în experienţa noastră idealizată, caracterul rectiliniu şi uniform al mişcării se datora absenţei oricărei forţe exterioare. Să presupunem acum că i se dă căruciorului, care se mişcă uniform, un impuls în direcţia mişcării sale. Ce se va întîmpla atunci ? Evident că el îşi va iuţi mişcarea. Tot atît de limpede este că un impuls în direcţia opusă mişcării va produce o micşorare a vitezei. în primul caz, mişcarea căruciorului a fost accelerată de impuls, în cazul al doilea, încetinită. De aici rezultă numaidecît că acţiunea unei forţe exterioare modifică viteza. Aşadar, nu viteza însăşi, ci variaţia ei este consecinţa împingerii sau a tragerii. O forţă măreşte sau micşorează viteza, după cum acţionează în sensul mişcării sau în sens contrar. Galileu a văzut clar acest fapt pe care 1-a formulat în lucrarea sa Două ştiinţe noi r

„...orice viteză o dată imprimată unui mobil se conservă riguros neschimbată, atîta vreme cît lipsesc cauze exterioare de accelerare sau intîrziere, condiţie realizată numai pe un plan orizontal, deoarece la planele care coboară există implicit o cauză de accelerare, pe cînd la cele care suie există o acţiune de intîrziere; de aici urmează că mişcarea pe un plan orizontal este o mişcare perpetuă, căci, dacă viteza este constantă, mişcarea nu poate fi micşorată sau încetinită şi cu atît mai puţin anihilată".
Urmînd firul conducător cel bun, putem să ajungem la o înţelegere mai adîncă a problemei mişcării. Legătura dintre forţă şi variaţia vitezei — nu legătura dintre forţă şi viteza însăşi, cum am putea gîndi bazîndu-ne exclusiv pe intuiţie — este baza mecanicii clasice, aşa cum a fost formulată de Newton.
Ne-am folosit de două noţiuni, care joacă un rol fundamental în mecanica clasică : forţa şi variaţia vitezei. In cursul dezvoltării ulterioare a ştiinţei, aceste noţiuni au fost extinse şi generalizate. Trebuie să le examinăm aşadar, mai îndeaproape.
Ce este forţa ? Intuitiv, noi simţim ce trebuie să înţelegem prin această expresie. Noţiunea aceasta rezultă din efortul desfăşurat la împingere, aruncare sau tragere, din senzaţia musculară care însoţeşte fiecare din aceste acte. Dar generalizarea ei depăşeşte mult cadrul acestor exemple simple. Putem să ne gîndim la o forţă fără a ne reprezenta un cal care trage o căruţă. Vorbim despre forţa de atracţie dintre Soare şi Pămînt, dintre Pămînt şi Lună, precum şi de forţele care produc fixul şi refluxul. Vorbim despre forţa cu

care Pămîntul ne reţine în sfera sa de influenţă pe noi şi toate lucrurile din jurul nostru şi despre forţa cu care vîntul produce valurile mării sau agită frunzele copacilor. Cînd şi unde constatăm o variaţie a vitezei, este răspunzătoare o forţă exterioară în sensul cel mai general. Newton scrie în Principia:
„Forţa activă este o acţiune exercitată asupra unui corp, în scopul de a-i schimba starea de repaus sau de mişcară rectilinie şi uniformă.
Această forţă rezidă numai în acţiunea însăşi şi nu rămîne în corp, cînd acţiunea a încetat, căci un corp îşi menţine orice nouă s^are căpătată exclusiv prin vis inertiae. Forţele active pot avea origini diferite cum este percuţia, presiunea, forţa centripetă'5.
5
Evoluţia fizicii
Dacă o piatră este aruncată dintr-un turn, mişcarea ei nu este cîtuşi de puţin uniformă ; viteza ei creşte pe măsură ce cade. Concludem că o forţă exterioară o acţionează în direcţia mişcării. Sau, cu alte cuvinte : Pămintul atrage piatra. Să luăm un alt exemplu. Ce se întîmplă cînd se aruncă o piatră vertical de jos în sus ? Viteza ei scade, pînă cînd piatra atinge punctul cel mai înalt al traiectoriei sale şi începe, apoi, să scadă. Această scădere a vitezei este produsă de aceeaşi forţă care determină accelerarea cînd piatra este lăsată să cadă ; numai că într-un caz, ea acţionează în direcţia mişcării, iar în cazul celălalt, în direcţia opusă mişcării. Forţa care acţionează este aceeaşi în ambele cazuri, ea produce însă o accelerare sau o încetinire, după cum piatra este lăsată să cadă sau este aruncată în sus.
§ 3. VECTORII
f
Toate mişcările pe care le-am considerat pînă acum au fost rectilinii. Acum trebuie să facem un pas mai departe. Vom înţelege legile naturii analizînd la început cazurile cele mai simple, lăsînd la o parte, în primele încercări, complicaţiile obscure. Evident că o linie dreaptă este mai simplă decît una curbă. Dar nu ne putem mulţumi numai cu înţelegerea mişcării rectilinii. Mişcarea Lunii, a Păn untului şi a celorlalte planete, adică tocmai mişcările cărora li s-au aplicat cu un succes atît de strălucit principiile mecanicii, se efectuează pe traiectorii curbe. Trecerea de la mişcarea rectilinie la mişcarea pe o traiectorie curbă prezintă noi dificultăţi. Dar trebuie să avem curajul de a le învinge, dacă vrem cu adevărat să înţelegem principiile mecanicii clasice care ne-au furnizat primele idei conducătoare şi au constituit punctul de plecare în dezvoltarea ştiinţei.
Să considerăm o altă experienţă idealizată, în care o sferă perfect lustruită se rostogoleşte uniform pe o masă netedă. Ştim că dacă i se imprimă un impuls, adică, dacă este supusă acţiunii unei forţe exterioare, viteza ei se schimbă. Să presupunem că, de data aceasta, direcţia
Ascensiunea concepţiei mecaniciste
impulsului nu coincide, ca în exemplul cu căruciorul, cu direcţia mişcării, ci are o direcţie cu totul diferită, de exemplu perpendiculară pe direcţia mişcării. Ce se va Sntîmpla actim cu sfera ? Pot fi deosebite trei faze : mişcarea iniţială, mişcarea sub acţiunea forţei şi mişcarea finală, după ce forţa a încetat să acţioneze. Conform legii inerţiei vitezele dinaintea şi după acţiunea forţei sînt constante. Dar există o diferenţă între mişcarea uniformă dinaintea acţiunii forţei şi cea de după acţiune şi anume : direcţia mişcării s-a schimbat. Direcţia mişcării iniţiale a sferei şi direcţia forţei sînt perpendiculare. Mişcarea finală nu va urma nici una dintre aceste două direcţii, ci va fi undeva intre ele, şi anume mai aproape de direcţia forţei, dacă impulsul a fost puternic şi viteza iniţială mică, şi dimpotrivă mai aproape de direcţia mişcării iniţiale, dacă impulsul a fost slab şi viteza iniţială mare. Noua noastră concluzie bazată pe legea inerţiei este că, în general, acţiunea unei) forţe exterioare nu schimbă numai viteza, ci şi direcţia de mişcare. înţelegerea acestui fapt ne-a pregătit îndeajuns pentru a trece la generalizarea introdusă în fizică prin conceptul de vector.
Putem continua să folosim şi mai departe metoda noastră simplă de a raţiona. Punctul de plecare este din nou legea inerţiei a lui Galileu. Sîntem departe de a fi epuizat toate consecinţele acestei idei conducătoare ce rezultă pentru dezlegarea tainei mişcării.
Să considerăm două sfere care se rostogolesc în direcţii diferite pe o masă netedă. Pentru a avea o imagine clară să presupunem că cele două direcţii sînt perpendiculare între ele. Deoarece nu acţionează forţe exterioare, mişcările sînt perfect uniforme. Să mai presupunem că vitezele sînt egale, adică ambele sfere străbat, în acelaşi timp, aceeaşi

distanţă. Este însă corect să spunem că ambele sfere au aceeaşi viteză ? »Răspunsul este da şi nu ! Este drept că dacă aparatele de măsurat vitezele a două automobile indică fiecare patruzeci de mile pe oră, se obişnuieşte să se spună că vehiculele au aceeaşi viteză, indiferent de direcţia în care ar înainta. Ştiinţa trebuie să-şi creeze limbajul şi noţiunile ei proprii, pentru propria ei folosinţă. Iniţial, noţiunile ştiinţifice coincid deseori cu

cele folosite în limbajul obişnuit utilizat în viaţa de toate zilele, însă ele se dezvoltă cu totul diferit. Ele se transformă, îşi pierd ambiguitatea legată de limbajul obişnuit, capătă precizie, astfel încît să poată fi aplicate în cugetarea ştiinţifică.

Din punctul de vedere fizic, este avantajos să se spună că vitezele celor două sfere care se mişcă în direcţii diferite, sînt diferite. Cu toate că aceasta nu este decît o chestiune de convenţie, este mai convenabil să se spună că patru automobile, care la o încrucişare de drumuri apucă pe patru căi diferite, nu au aceeaşi viteză, chiar dacă, vitezometrele indică toate cincizeci de kilometri pe oră. Această diferenţiere dintre viteza ca valoare absolută şi viteza ca mărime care are direcţie, ilustrează modul cum fizica, pornind de la noţiuni provenite 4in viaţa de toate zilele, le preface astfel încît să fie fructuoase pentru dezvoltarea ştiinţei.

Cînd măsurăm o lungime, rezultatul se exprimă printr-un anumit număr de unităţi. Lungimea unui băţ poate să fie de 1,20 m etc, greutatea unui obiect anumit poate fi de 3,75 kgf, un interval de timp va fi exprimat printr-un anumit număr de minute sau secunde. în toate aceste cazuri rezultatul măsurării se exprimă printr-un număr. Un număr singur este adesea insuficient pentru descrierea unor anumite concepte fizice. «Recunoaşterea acestui fapt marchează un însemnat progres în cercetarea ştiinţifică. Pentru caracterizarea unei viteze, de exemplu, o orientare este tot atît de esenţială ca şi un număr. O asemenea mărime care posedă nu numai o valoare numerică, ci şi o orientare se numeşte vector. Un simbol potrivit pentru vector este săgeata. Viteza se reprezintă, de obicei, printr-o săgeată sau, în termeni ştiinţifici, printr-un vector, a cărui lungime, la o scară aleasă după voie indică valoarea absolută a vitezei şi care este orientat pe direcţia mişcării.

Dacă patru automobile se îndepărtează de la o răscruce de drum cu aceeaşi viteză în valoare absolută, dar în direcţii diferite, vitezele lor pot fi reprezentate prin patru vectori de aceeaşi lungime, ca în fig. 1. La scara aleasă, un centimetru reprezintă 20 km/h. Orice viteză

poate fi reprezentată în modul acesta printr-un vector şi invers, dacă scara este dată, viteza se poate determina dintr-o astfel de diagramă vectorială.

Dacă două vehicule se întîlnesc pe o şosea şi vitezometrele lor indică fiecare 50 km/h, atunci vitezele lor vor fi reprezentate prin doi vectori de aceeaşi lungime dar cu săgeţile îndreptate în sensuri contrare (fig. 2). De asemenea, săgeţile care indică (la metrouri) „spre New York", sau „de la New York*4 trebuie să aibă sensuri contrare. Dar toate trenurile care trec prin staţii diferite sau merg pe căi paralele Fig. 1

cu acelaşi număr de kilometri pe oră au aceeaşi viteză care trebuie reprezentată printr-un vector unic. Nici unul din elementele vectorului nu indică prin care- staţii trece trenul, nici pe care căi se deplasează. Cu alte cuvinte, potrivit convenţiei adoptate, toţi vectorii reprezentaţi în fig. 3 trebuie socotiţi egali, deoarece sînt situaţi în lungul aceleiaşi drepte sau au direcţii paralele, iar săgeţile lor sînt îndreptate în a-celaşi sens. Figura 4 arată vectori diferiţi (între ei) deose-bindu-se fie prin lungime, fie prin direcţie, fie prin amîn-

Fig. 2 • Fig. 3

două. Aceiaşi patru vectori pot fi figuraţi în alt mod în care toţi pornesc din acelaşi punct în direcţiile respective (fig. 5). Cum punctul de plecare nu are importanţă* aceşti vectori pot reprezenta tot aşa de bine vitezele a patru vehicule, care pornesc din acelaşi punct sau vite-

/ Fig. 4 C—--

zele a patru vehicule care se deplasează în diferite regiuni ale ţării cu vitezele respective şi în direcţiile Fig. 5
indicate.
Această reprezentare vectorială poate fi acum folosită pentru a descrie faptele discutate anterior în legătură cu mişcarea rectilinie. Era vorba despre un cărucior, în mişcare uniformă şi rectilinie şi care, primind un impuls în direcţia mişcării îşi măreşte viteza. Grafic» acesta se reprezintă prin doi vectori, cel mai scurt indi-cînd viteza anterioară impulsului şi unul mai lung, dar cu aceeaşi orientare, inldicînd viteza căpătată după im-plus (fig/6); Este clară semnificaţia vectorului punctat : el reprezintă variaţia de viteză, de care este responsabil* după cum ştim, impulsul. în cazul în care forţa acţionează în sens contrar mişcă-
-*^-------^ rii, încetinind-o, dia-
2 grama se prezintă pu-
ţin diferit. Vectorul F1S- 6 punctat reprezintă şi în
cazul acesta variaţia
-^ vitezei, dar sensul lui
2 este inversat (fig. 7).
Este evident că nu nu-Fig 7 mai viteza însăşi, dar
Ascensiunea concepţiei mecaniciste
7
şi variaţia ei este un vector. Cum orice variaţie de viteză este cauzată de acţiunea unei forţe exterioare, forţa trebuie să fie de asemenea reprezentată printr-un vector. Pentru caracterizarea unei forţe nu este de ajuns să se indice cît de tare este împins căruciorul, ci trebuie precizată şi direcţia în care are loc împingerea. Forţa, întocmai ca viteza şi ca variaţia vitezei, trebuie reprezentată printr-un vector şi nu numai printr-un singur număr. Prin urmare : forţa exterioară este tot un vector şi trebuie să aibă a-ceeaşi orientare ca şi variaţia vitezei. In cele două figuri din urmă (fig. 6 şi 7),vectorii punctaţi indică atît direcţia forţei cît şi variaţia vitezei.
Scepticul ar putea obiecta că nu vede nici un avantaj în introducerea vectorilor. Tot ce am realizat pînă acum este să transcriem fapte cunoscute într-un limbaj necunoscut şi complicat. în această fază ar fi, in adevăr, greu să-1 convingem că punctul lui de vedere este greşit. Ne vedem, deci, nevoiţi să-i dăm dreptate, pentru moment. Dar, vom ved£a că toctnai acest limbaj ciudat ne conduce la o generalizare importantă, în care vectorii sînt mărimi esenţiale.
§ 4. ENIGMA MIŞCĂRII
Cîtă vreme ne mărginim numai la studiul mişcării rectilinii, sîntem departe de a înţelege mişcările observate în natură. Trebuie să considerăm mişcările ce au loc pe traiectorii curbe, iar noul nostru pas este să stabilim legile care le guvernează. Aceasta nu este o sarcină uşoară, în cazul mişcării rectilinii, noţiunile de „viteză", „variaţie a vitezei" şi „forţă" s-au dovedit deosebit de utile. Nu ne dăm seama imediat cum am putea să le aplicăm şi mişcărilor pe traiectorii curbe. S-ar putea presupune chiar că vechile noţiuni nu sînt proprii pentru a descrie mişcarea generală şi că trebuie create noţiuni noi. Trebuie să încercăm a urma drumul cel vechi sau să căutăm un altul ?
Generalizarea unui concept este un procedeu folosit curent în ştiinţă. Metodele de generalizare nu sînt univoc determinate căci există numeroase căi de a ajunge la
7
Evoluţia fizicii
acelaşi rezultat. Există totuşi o restricţie care trebuie respectată în mod absolut : noţiunea generalizată trebuie să poată fi redusă la cea primitivă, de îndată ce condiţiile în care a fost introdusă ultima sînt realizate.
Putem explica aceasta, cel mai bine, chiar prin exemplul cu care ne-am ocupat pînă acum. Să încercăm să generalizăm vechile noţiuni de viteză, variaţie a vitezei şi forţă, astfel încît să le putem aplica şi mişcării curbilinii. Dintr-un punct de vedere mai general, noţiunea de curbă include şi dreapta ; ea este un caz particular, un exemplu simplu de curbă. Prin urmare, aplicînd noţiunile de viteză, variaţie a vitezei şi forţă mişcării de-a lungul unei curbe, le aplicăm în mod automat şi mişcării rectilinii. Dar rezultatul acesta nu trebuie să contrazică rezultatele stabilite mai înainte. Cînd curba devine o (linie) dreaptă, trebuie să putem reduce toate noţiunile generalizate la cele cunoscute pentru mişcarea rectilinie. Această restricţie nu este suficientă ca să determine generalizarea în

mod univoc. Ea lasă deschise mai multe posibilităţi. Istoria ştiinţei ne arată că generalizările cele mai simple, uneori se dovedesc a fi fecunde, alteori nu. La început trebuie să facem o presupunere. în cazul nostru este uşor să intuim procedeul corect de generalizare. Noile noţiuni se dovedesc foarte fecunde şi ne vor ajuta să înţelegem atît mişcarea unei pietre aruncate, cît şi mişcarea planetelor.
Să vedem mai întîi ce este viteza, variaţia vitezei şi forţa, în cazul general al mişcării pe o curbă. Vom începe ou viteza. Să presupunem că de-a lungul curbei din figură se mişcă de la stînga spre dreapta un corp foarte mic (fig. 8). Un astfel de corp mic este numit o particulă. Punctul de pe curbă indică poziţia particulei la un moment dat. Care este viteza particulei în acest moment şi în această poziţie ? Şi de data aceasta descoperirea lui Galileu ne sugerează o modalitate de a introduce noţiunea de viteză. Din nou trebuie să dăm friu liber fanteziei noastre să imagineze o experienţă idealizată. Particula se mişcă în lungul curbei de la stînga la dreapta, sub acţiunea unor forţe exterioare. Să admitem că, la un moment dat şi anume tocmai cînd particula trece prin locul in

dicat de punctul negru din figură, acţiunea tuturor acestor forţe ar înceta brusc. Atunci potrivit legii inerţiei, mişcarea ar trebui să devină uniformă. Bineînţeles că, in practică, nu putem sustrage nici un corp tuturor acţiunilor exterioare. Putem cel mult să facem o ipoteză : „Ce s-ar întîmpla dacă...?" şi să apreciem justeţea ipotezei noastre după concluziile care pot fi trase în concordanţă cu experienţa.
Figura 8.
în fig. 9 vectorul indica direcţia ipotetică în care s-ar face mişcarea uniformă din momentul în care s-ar anula toate forţele exterioare.
Aceasta este direcţia aşa-numitei tangente. Privind la microscop o particulă in mişcare, vedem o porţiune foarte mică a traiectoriei ce apare ca un mic segment.
Fig. 9.
Tangenta este prelungirea acestui segment. Prin urmare, vectorul din fig. 9 reprezintă viteza la un moment dat. Vectorul viteză este situat în lungul tangentei. Lungimea lui indică valoarea numerică a vitezei, adică viteza care este indicată de vitezometrele automobilelor.
Experienţa noastră idealizată, prin care întrerupem mişcarea pentru a găsi vectorul viteză, nu trebuie luată prea în serios. Ea ne ajută numai să înţelegem ce trebuie să numim vector viteză şi ne dă posibilitatea să determi

năm acest vector într-un punct anumit si la un moment dat.
în fig. 10 sînt reprezentaţi vectorii viteză pentru trei poziţii deosebite ale unei particule care se mişcă pe o curbă. în cazul de faţă, în cursul mişcării, variază nu numai direcţia vitezei, ci şi valoarea ei, cum este indicat prin lungimile vectorilor.
Satisface această nouă noţiune de viteză condiţia formulată mai sus, pentru orice generalizare ? Cu alte cuvinte, se reduce ea la o noţiune cunoscută, atunci cînd curba se reduce la o dreaptă ? Evident că da. Tangenta la o dreaptă coincide cu dreapta însăşi. Vectorul viteză este situat chiar în lungul dreptei, exact ca în exemplele cu căruciorul şi cu sfera care se rostogoleşte.
Fig.10
Pasul următor consistă in introducerea noţiunii» de variaţie a vitezei pentru o particulă care se mişcă pe o curbă. Şi aceasta se poate realiza în diferite moduri, dintre care noi alegem pe cel mai simplu şi mai convenabil, în fig. 10 am arătat mai mulţi vectori viteză ce caracterizează mişcarea în diferite puncte ale traiectoriei. Primii doi îi putem aşeza astfel ca să aibă o origine comună, ceea ce, după cum am văzut, este îngăduit în cazul vectorilor. Vectorul punctat îl vom numi variaţia vitezei. Originea sa coincide cu vîrful primului vector şi extremitatea sa cu vîrful vectorului al doilea. La prima vedere această definiţie a variaţiei vitezei pare artificială şi lipsită de sens. Ea devine mult mai clară în cazul particular în care vectorii 1 şi 2 au aceeaşi direcţie. Aceasta echivalează cu trecerea la mişcarea rectilinie. Dacă cei doi vectori au acelaşi punct iniţial, vectorul punctat uneşte extremităţile lor. Graficul este acum identic cu cel repre

rentat în fig. 6 şi am regăsit prima noţiune ca un caz particular al celei noi. Trebuie să precizăm că am separat cele două linii din figură, numai pentru că altfel ar coincide şi nu s-ar putea distinge (fig. 13).
Acum trebuie să facem ultimul pas in procesul nostru de generalizare. Facem totodată ipoteza cea mai importantă din cele făcute pînă acum. Ne propunem să stabilim legătura dintre forţă şi variaţia vitezei, pentru a găsi astfel cheia întregii probleme generale a mişcării.
Cheia explicării mişcării rectilinii a fost simplă : forţa exterioară este cauza variaţiei vitezei ; vectorul forţă şi vectorul variaţie a vitezei au aceeaşi orientare. Care este acum cheia mişcării curbilinii ? Ei bine, ea este exact aceeaşi ! Cu deosebirea că, în cazul acesta, noţiunii de variaţie a vitezei trebuie să-i atribuim o semnificaţie mai largă. Pentru a ne lămuri este de ajuns să aruncăm o privire asupra vectorilor punctaţi din fig. 11 şi fig. 12. O dată cunoscută viteza în toate punctele unei curbe, se poate deduce imediat direcţia forţei, în orice punct. Pentru aceasta figurăm vectorii viteză pentru două momente separate printr-un interval de timp foarte scurt, corespunzător la două poziţii foarte apropiate. Vectorul cu originea în vîrful primului vector şi cu virful său în vîrful celui de-al doilea indică _;
direcţia forţei care acţio-
nează. Este esenţial ca cei 2_
doi vectori viteză să fie Fig 13
separaţi numai printr-un
interval de timp „foarte scurt". Analiza riguroasă a noţiunilor „foarte apropiat" şi „foarte scurt" este departe de a fi simplă. In adevăr, tocmai această analiză i-a condus pe Newton şi Leibnitz la crearea calculului diferenţial.
Fig. 11
Fig. 12

Evoluţia fizicii
Un drum anevoios şi cu grijă construit a dus la generalizarea ideii lui Galileu. Nu este locul să arătăm aici, cît de bogate şi fecunde s-au dovedit consecinţele acestei
Fig.14
generalizări. Acest drum conduce la explicaţii simple şi convingătoare a multor fapte care erau neînţelese şi discordante in acea vreme.
Din varietatea foarte bogată a mişcărilor, să alegem numai pe cele mai simple şi să aplicăm, pentru a le explica, legea formulată mai sus.
Un obuz, lansat din-tr-un tun, o piatră aruncată oblic în sus, o vînă de Fig 15 apă care ţîşneşte dintr-un
furtun, descriu toate acelaşi tip bine cunoscut de traiectorii, anume parabole. Să ne închipuim că am putea adapta un vitezo-metru unei pietre, astfel încît să fim în măsură sâ figurăm vectorul viteză în orice moment al mişcării ei. Am obţine atunci o reprezentare în genul celei din fig. 14. Direcţia forţei
care solicită piatra este Fig. 16 exact direcţia variaţiei vi
Ascensiunea concepţiei mecaniciste
tezei şi am văzut cum trebuie determinată. Rezultatul indică, după cum arată fig. 15, că forţa este verticală şi îndreptată de sus în jos. Aceasta se petrece exact la fel ca în cazul pietrei lăsată să cadă din vîrful unui turn. Traiectoriile sînt total diferite, ca şi vitezele, dar variaţia vitezei are aceeaşi direcţie, anume spre centrul Pămîntului.
O piatră fixată de capătul unei sfori şi învîrtită într-un plan orizontal descrie o traiectorie circulară (fig. 16). Dacă iuţeala este uniformă, toţi vectorii diagramei reprezentative vor avea aceeaşi lungime. Cu toate acestea, viteza nu este constantă căci traiectoria nu este rectilinie. Numai mişcarea uniformă rectilinie nu implică forţe. Aici însă, există o forţă şi viteza variază, dacă nu-in valoare, totuşi în direcţie. Potrivit legii de mişcare,, trebuie să existe o forţă care să producă această variaţie;: această forţă, în cazul de faţă, se exercită între piatră şi mîna care ţine sfoara. Se naşte imediat o nouă întrebare : în ce direcţie acţionează forţa ? Iarăşi diagrama vectorială ne dă răspunsul. Figurăm vectorii viteză pentru; două puncte foarte apropiate şi apoi
vectorul variaţie a vitezei (fig. 17). Acest din urmă vector, după cum i
se vede, este îndreptat în lungul * sforii către centrul cercului şi este
în permanenţă perpendicular pe vectorul viteză, respectiv pe tangentă.

Cu alte cuvinte, mîna exercită o acţiune asupra pietrei prin mijlo- Fîg 17
cirea sforii.
Foarte asemănător este exemplul mai important al revoluţiei Lunei în jurul Pămîntului. Aceasta poate fi reprezentată, aproximativ, printr-o mişcare circulară uniformă. Forţa este îndreptată spre Pămînt pentru acelaşi motiv pentru care în exemplul precedent fusese îndreptată către mînă. Bineînţeles, Pămîntul şi Luna nu sînt legate între ele printr-o sfoară, dar ne putem imagina o-linie care uneşte centrele acestor două corpuri cereşti ; forţa se află de-a lungul acestei linii şi este îndreptată către centrul Pămîntului, întocmai ca forţa care acţio

nează asupra unei pietre aruncate oblic sau lăsată să cadă dintr-un turn.
Tot ceea ce am spus pînă acum despre mişdări poate ii rezumat într-o singură formulare : Forţa şi variaţia vitezei sînt vectori care au aceeaşi orientare. Aceasta este ideea conducătoare iniţială în problema mişcării, dar desigur, ea nu este suficientă pentru explicarea deplină a tuturor mişcărilor observate. Tranziţia de la felul de a gîndi al lui Aristotel la cel al lui Galileu a constituit cea mai importantă piatră unghiulară la temelia ştiinţei. O dată această cotitură trecută, linia de dezvoltare viitoare devenea clară.
Interesul nostru este concentrat acum asupra primelor faze ale acestei dezvoltări, în urmărirea primelor fire conducătoare, in a arăta cum s-au născut noile concepte fizice în lupta grea cu vechile idei. Ne ocupăm numai de munca pionierului în ştiinţă, care consistă în descoperirea căilor de dezvoltare noi şi nebănuite, de cutezanţele gîndirii ştiinţifice, care produc o necontenită schimbare a imaginii noastre despre Univers. Primii paşi hotărîtori au întotdeauna un caracter revoluţionar. Imaginaţia ştiinţifică găseşte prea înguste vechile concepte şi le înlocuieşte prin altele noi. Dezvoltarea continuă, pe calea de acum trasată, păstrează caracterul său evolutiv, pînă ajungem la un punct de cotitură, cînd trebuie cucerit un nou domeniu. Pentru a înţelege, totuşi, care motive şi care dificultăţi ne forţează să introducem o schimbare a conceptelor fundamentale, trebuie să cunoaştem nu numai ideile conducătoare, ci trebuie să cunoaştem şi concluziile pe care le putem trage din ele.
Una dintre caracteristicile cele mai importante ale fizicii moderne este că concluziile pe care le stabileşte pe baza ideilor iniţiale nu sînt numai calitative, ci şi cantitative. Să revenim la piatra lăsată să cadă din vîrful unui turn. Am văzut că viteza ei creşte in timpul căderii ; am dori să aflăm mai mult. Cît de mare este această creştere ? Care este poziţia şi viteza pietrei într-un moment oarecare după începerea căderii ei ? Am dori să fim în măsură să prevedem evenimentele şi să determinăm prin experienţă dacă aceste prevederi, şi prin urmare, presupunerile iniţiale sînt confirmate.
Ascensiunea concepţiei mecaniciste

Pentru a trage concluzii cantitative, trebuie să folosim limbajul matematicii. Majoritatea ideilor fundamentale ale ştiinţei sînt simple şi pot fi, de regulă, exprimate pe înţelesul tuturor. Pentru a urmări însă aceste idei se cere cunoaşterea unei tehnici de cercetare extrem de rafinate. Matematicile, ca instrument de raţionament, sînt necesare dacă vrem să tragem concluzii care pot fi comparate cu experienţa. Cîtă vreme ne mărginim la ideile funda-

Fig. 18

mentale ale fizicii, ne putem dispensa de limbajul matematicii. Deoarece în aceste pagini noi îl vom evita în mod sistematic, vom fi forţaţi ca, la nevoie, să citäm fără demonstraţie unele dintre rezultatele necesare pentru înţelegerea punctelor de vedere importante care se vor ivi în cursul dezvoltării ulterioare. Preţul care trebuie plătit pentru părăsirea

limbajului matematic constituie o pierdere în precizie şi necesitatea de a cita uneori rezultate, fără a arăta cum au fost dobîndite.
Un exemplu foarte important de mişcare este mişcarea Pămîntului în jurul Soarelui. Se ştie că orbita Pă-tnîntului este o curbă închisă numită elipsă (fig. 18). Diagrama vectorială a variaţiei vitezei arată că forţa care se exercită asupra Pămîntului este îndreptată către Soare. Cu aceasta încă n-am aflat mare lucru. Am dori să putem prevedea poziţia Pămîntului şi a celorlalte planete la un moment dat, să prevedem data şi durata eclipsei

de Soare următoare şi multe alte fenomene astronomice-Aceasta este posibil, dar nu numai pe baza primului nostru element căci, in afară de direcţia forţei, trebuie să cu-noaştem şi valoarea ei absolută, mărimea ei. Din impasul a-cesta ne-a scos Newton printr-o intuiţie inspirată. Potrivit legii gravitaţiei, enunţată de el, forţa de atracţie dintre corpuri depinde într-un mod simplu de distanţa dintre ele. Cu cît distanţa este mai mare, cu atît atracţia este mai mică. Mai precis : dacă distanţa se dublează, forţa de atracţie devine de 2 X 2 = 4 ori mai mică, cînd distanţa se triplează, forţa devine de 3 X 3= 9 ori mai mică etc.
Vedem astfel că în cazul atracţiei gravitaţionale am reuşit să exprimăm într-un mod simplu, felul în care depinde forţa de distanţa care separă două corpuri în mişcare. Procedăm analog şi în toate celelalte Cazuri, în care este vorba de forţe de altă natură, de exemplu forţe electrice, magnetice etc. încercăm să întrebuinţăm o expresie simplă pentru forţa dată, dar o asemenea expresie este justificată numai dacă concluziile deduse din ea sînt confirmate de experienţă.
Dar cunoaşterea forţei gravitaţionale singură nu este suficientă pentru a descrie mişcarea planetelor. Am văzut că vectorii reprezentativi ai forţei şi variaţiei de viteză au aceeaşi direcţie pentru intervale de timp scurte, dar trebuie să urmărim cu un pas mai departe pe Newton şi să admitem o relaţie simplă între lungimile acestor vectori. în condiţii identice, adică, pentru unul şi acelaşi corp mobil şi pentru variaţii în intervale de timp egale,, variaţia vitezei este, după Newton, proporţională cu forţa.
Prin urmare, pentru a stabili concluzii cantitative cu privire la mişcarea planetelor, sînt necesare numai două ipoteze complementare. Una are caracter general şi exprimă relaţia dintre forţă şi variaţia vitezei. Cealaltă are caracter particular, ea stabileşte o dependenţă exactă între un tip special de forţă şi distanţa dintre două corpuri. Prima este legea generală a mişcării, a lui Newton, cea de-a doua este legea gravitaţiei ; ele determină,, împreună, mişcarea. Acestea pot fi lămurite prin următorul raţionament, puţin cam greoi. Să admitem că am determinat, la un moment dat, poziţia şi viteza unei pla

nete, precum şi forţa care acţionează asupra ei. Atunci, din legea mişcării, a lui Newton, aflăm variaţia vitezei pentru un interval de timp scurt. Cunoscînd atît viteza iniţială cît şi variaţia ei, putem determina viteza şi poziţia planetei la sfîrşitul intervalului de timp. Repetînd (de mai multe ori) acest procedeu putem să construim întreaga orbită a planetei, fără a recurge la alte date de observaţie. Acesta este, în principiu, procedeul folosit de mecanică pentru a prevedea traiectoria unui corp în mişcare, numai ca metoda folosită aici este puţin practică. Un astfel de procedeu de înaintare, pas cu pas, s-ar dovedi a fi nu numai extrem de anevoios, dar şi neexact. Din fericire el este cu totul de prisos ; matematica ne oferă un drum mai scurt şi permite o descriere precisă a mişcării, cu mult mai puţină cerneală decît ne trebuie pentru a scrie o singură frază. Concluziile la care ajungem, în acest mod, pot fi confirmate sau dtesminţite de observaţii.
Acelaşi tip de forţă exterioară se găseşte în căderea unei pietre şi în mişcarea Lunii pe orbita sa, anume atracţia exercitată de Pămînt asupra tuturor corpurilor materiale. Newton a recunoscut că mişcarea pietrei în c'ădere, a Lunii, şi a planetelor sînt numai manifestări foarte particulare ale forţei de atracţie universală, care se exercită între două corpuri. în cazurile simple, mişcarea poate fi descrisă şi prezisă cu ajutorul matematicii. în cazuri mai puţin curente şi în cele extrem de complicate în care intră în joc acţiunile reciproce ale mai multor corpuri, descrierea matematică nu mai este aşa de simplă, dar principiile de bază folosite sînt acelaşi.

Concluziile la care am ajuns, urmînd primele noastre idei conducătoare, sînt verificate în mişcarea pietrei aruncată în aer, în mişcarea Lunii, a Pămîntului şi a planetelor. întregul nostru sistem de ipoteze trebuie să fie confirmat sau infirmat, în întregime, de experienţă. Nici una din presupuneri nu poate fi izolată din ansamblu şi examinată separat. în cazul rotaţiei planetelor în jurul Soarelui, sistemul nostru mecanic se verifică strălucit. Totuşi, putem să ne imaginăm şi un alt sistem, bazat pe ipoteze diferite, ce ar fi fost tot atît de eficient.

Noţiunile fizice sînt creaţii libere ale minţii omeneşti şi nu sînt univoc determinate, aşa cum s-ar putea crede, de lumea exterioară. în străduinţele noastre de a pricepe realitatea, semănăm cu un om care încearcă să înţeleagă mecanismul unui ceas de buzunar închis. El vede cadranul şi arătătoarele în mişcare, aude tic-tacul ceasului, dar nu are nici o posibilitate să deschidă capacul. Dacă este ingenios, îşi va face o imagine oarecare a mecanismului, pe care o va face responsabilă de tot ce observă, dar nu va fi niciodată sigur, că imaginea sa este singura capabilă să explice obsevaţiile sale. El nu va fi niciodată în stare să compare mecanismul ipotetic cu cel real şi nici măcar nu poate să-şi reprezinte posibilitatea sau semnificaţia unei asemenea comparaţii. El crede, cu siguranţă, că pe măsură ce cunoştinţele sale vor creşte, imaginea sa despre realitate se va simplifica tot mai mult şi va putea explica domenii din ce în ce mai largi de impresii ale simţurilor sale. Poate că este convins şi de existenţa unei limite ideale a cunoaşterii pe care o poate atinge mintea omenească. El va putea numi această limită, adevărul obiectiv.

§ 5. ÎNCĂ O IDEE CONDUCĂTOARE

Cînd începem studiul mecanicii, avem impresia că în această ramură totul este simplu, fundamental şi definitiv elucidat. Cu greu i-ar trece cuiva prin minte că a mai rămas o cale importantă neobservată de nimeni timp de trei secole. Această cale neglijată este legată de una din noţiunile fundamentale ale mecanicii şi anume de masă.

Să reluăm experienţa noastră idealizată, simplă, cu căruciorul care se mişcă pe un drum perfect neted. Căruciorul, iniţial în repaus, primind un impuls, se va mişca uniform, cu o viteză anumită. Să presupunem că acţiunea forţei poate fi repetată de cîte ori dorim, astfel ca mecanismul care imprimă impulsuri să acţioneze de fiecare dată în acelaşi mod, exercitînd aceeaşi forţă asupra aceluiaşi cărucior. Ori de cîte ori s-ar repeta experienţa, viteza tfobîndită va fi aceeaşi. Ce s-ar întîmpla insă dacă am modifica experienţa, căruciorul fiind la început goi

şi apoi încărcat ? Căruciorul încărcat va avea o viteză finală mai mică decît cel gol. De aici rezultă că dacă asupra a două corpuri diferite, aflate iniţial în repaus, acţionează aceeaşi forţă, după încetarea ei cele două corpuri nu vor avea aceeaşi viteză. Spunem că viteza depinde de masa corpului şi, anume, este cu atît mai mică cu cît masa este mai mare.

Ştim deci, cel puţin în teorie, cum să determinăm, masa unui corp sau mai exact, să stabilim de cîte ori este mai mare o masă decît alta. N-avem decît să supunem cele două mase de comparat, iniţial în repaus, acţiunii unor forţe identice. Dacă găsim, de exemplu, că prima capătă o viteză de trei ori mai mare decît a doua, deducem că prima masă este de trei ori mai mică decît cealaltă. Bineînţeles că acesta nu este un procedeu tocmai practic de a determina raportul a două mase. Nu este însă mai puţin adevărat că masa poate fi determinată prin procedeul acesta sau prin altul analog, bazat tot pe aplicarea legii inerţiei.

Cum determinăm însă în practică masa ? Se înţelege că nu în modul descris mai sus. Răspunsul corect îl poate da oricine : o determinăm prin cîntărire, cu ajutorul balanţei. Să examinăm puţin mai de aproape cele două metode deosebite de determinare a masei. Prima experienţă nu are nimic de aface cu gravitaţia, cu atracţia Pămîntului. Căruciorul se mişcă pe un plan orizontal perfect neted, sub acţiunea impulsului primit. Forţa gravitaţională care menţine căruciorul în contact cu planul, nu variază şi, prin urmare, nu trebuie luată în considerare la determinarea masei. La cîntărire însă, situaţia este cu totul alta. Balanţa nici nu ar putea fi concepută dacă Pămîntul nu ar atrage corpurile, dacă nu ar exista gravitaţia. Deosebirea dintre cele două procedee de determinare a masei,

consistă în faptul că pe cînd primul nu are nimic de a face cu gravitaţia, cel de al doilea se bazează esenţial pe existenţa ei.
Ne întrebăm acum : dacă determinăm raportul dintre două mase prin cele două metode descrise mai sus, găsim acelaşi rezultat ? Experienţa ne dă un răspuns categoric

amîndouă procedeele dau acelaşi rezultat. Concluzia aceasta nu putea fi însă prevăzută ; ea se bazează pe observaţie, nu pe raţiune. Să numim, pentru simplicitate, masă inertă masa determinată cu ajutorul primului procedeu şi masă, gravifică pe cea determinată cu procedeul al doilea. Se constată că în Universul nostru cele două mase sînt egale, dar ne putem închipui că ele ar fi putut să fie diferite. Numaidecît se naşte o nouă întrebare : această egalitate este accidentală sau trebuie să i se atribuie o semnificaţie mai adîncă ? Răspunsul, din punctul de vedere a fizicii clasice, este : egalitatea celor două mase este accidentală şi nu trebuie să-i atribuim o semnificaţie mai adîncă. Răspunsul fizicii moderne este exact contrariu : egalitatea celor două feluri de mase este fundamentală şi ea constituie un fir conducător nou şi important, care duce la o înţelegere mai adîncă a fenomenelor. Aceasta a fost, de fapt, una dintre cele mai importante idei pe baza căreia s-a dezvoltat aşa-numita teorie a relativităţii generale.
Un roman poliţist este de calitate inferioară dacă explică evenimentele stranii drept întîmplătoare. Simţim desigur mai multă satisfacţie dacă acţiunea se desfăşoară după o schemă raţională. Tot astfel şi o teorie care oferă o explicaţie pentru egalitatea dintre masa gravifică şi cea inertă este superioară unei teorii care interpretează această identitate ca fiind accidentală, bineînţeles, dacă ambele teorii concordă în aceeaşi măsură cu faptele observate.
întrucît egalitatea dintre masa inertă şi cea gravifică :a avut un rol fundamental în formularea teoriei relativităţii, sîntem îndreptăţiţi să o examinăm ceva mai îndeaproape. Care sînt faptele experimentale care dovedesc în mod incontestabil că cele două mase sînt egale ? Răspunsul se află în vechile experienţe ale lui Galileu, cînd a lăsat să cadă dintr-un turn corpuri de mase diferite. El a Constatat că timpul de cădere este întotdeauna acelaşi, cu alte cuvinte, că mişcarea unui corp în cădere este independentă de masa lui.
Pentru a stabili însă corelaţia dintre acest rezultat experimental simplu, dar foarte important, şi egalitatea

celor două feluri de masă, este nevoie de un raţionament destul de complicat.
Sub acţiunea unei forţe exterioare, un corp în repaus se pune în mişcare şi atinge o viteză anumită. El se urneşte mai uşor sau mai greu, în funcţie de masa lui inertă ; cu cît această masă este mai mare, cu atît corpul se opune mai puternic tendinţei de a-1 pune în mişcare. Putem spune, fără a avea pretenţii de rigurozitate, că promptitudinea cu care un corp răspunde la acţiunea unei forţe exterioare depinde de masa sa inertă. Dacă ar fi just că Pămîntul atrage toate corpurile cu aceeaşi forţă, atunci corpul cu masa inertă cea mai mare ar cădea mai încet dedt toate celelalte. Acesta nu este cazul : toate corpurile cad la fel de repede. De aici rezultă că forţa cu care Pămîntul atrage mase diferite este diferită. Dar Pămîntul atrage o piatră cu forţa greutăţii şi nu ştie nimic de masa ei inertă. Forţa cu care Pămîntul „cheamă" piatra depinde de masa ei gravifică. Dimpotrivă, mişcarea prin care ea „răspunde" acestei chemări depinde numai de masa ei inertă. Dat fiind că mişcarea de „răspuns" este totdeauna aceeaşi, toate corpurile lăsate să cadă de la aceeaşi înălţime cad la fel, trebuie să deducem ca masa gravifică şi masa inertă sînt egale.
Fizicianul formulează acest adevăr ceva mai pedant : acceleraţia unui corp în cădere liberă creşte proporţional cu masa lui grea şi se micşorează proporţional cu masa lui inertă. întrucît toate corpurile în cădere liberă au una şi aceeaşi acceleraţie, cele două mase trebuie să fie egale.
în povestirea noastră despre marile taine ale naturii, nu există probleme pe deplin rezolvate şi definitiv închise. După 300 de ani am fost puşi în situaţia de a ne întoarce la problema iniţială a mişcării şi de a revizui procedeul de investigaţie, pentru a găsi noţiuni trecute cu vederea odinioară, făurindu-ne astfel o nouă imagine a Universului.
§ 6. ESTE CĂLDURA O SUBSTANŢĂ ?

Să pornim acum pe o ncuă cale cu punctul de plecare m domeniul fenomenelor calorice. Fără discuţie, este imposibil să descompunem ştiinţele naturii în domenii dispa-

rate fără legături între ele. în adevăr, vom vedea îndată că noţiunile noi introduse aici se împletesc cu cele familiare precum şi cu cele pe care le vcm mai întîlni. O linie de gîndire dezvoltată într-o anumită ramură a ştiinţei poate fi deseori folosită la descrierea unor fenomene, care, în aparenţă, au un caracter cu totul diferit.
în acest proces, noţiunile primitive se modifică deseori astfel încît să înlesnească atît înţelegerea fenomenelor din care au derivat, cît şi a celor cărora urmează să le fie aplicate.
Noţiunile cele mai importante necesare pentru descrierea fenomenelor calorice sînt temperatura şi căldura. A durat neînchipuit de mult pînă cînd ştiinţa a stabilit distincţia dintre aceste două noţiuni, dar o dată făcută această distincţie, au rezultat progrese rapide. Deşi aceste noţiuni sînt astăzi familiare oricui, le vom examina mai îndeaproape, subliniind mai cu seamă deosebirile dintre ele.
Simţul nostru tactil ne spune clar că cutare corp este cald şi cutare corp este rece. Dar acesta este un criteriu pur calitativ, insuficient pentru o descriere cantitativă şi care uneori este chiar ambiguu. Putem arăta aceasta cu ajutorul unei experienţe bine cunoscute : să considerăm trei vase, conţinînd respectiv, apă rece, apă caldă şi apă fierbinte. Intraducînd o mină în apa rece şi pe cealaltă în apa fierbinte, vom primi o indicaţie de la prima mînă că este rece şi de la cea de a doua că este fierbinte. Introducînd apoi ambele mîinî, în acelaşi timp, în apa caldă, cele două mîini ne vor transmite senzaţii contradictorii. Tot din aceeaşi cauză, un eschimos şi un locuitor al zonei ecuatoriale, cari s-ar întîlni într-c zi de primăvară la New York, n-ar putea cădea de acord dacă vremea este caldă sau rece. Toate problemele de acest fel le rezolvăm cu ajutorul termometrului, un instrument pe care 1-a construit mai întîi Galileu într-o formă primitivă. Din nou acest nume bine cunoscut ! Utilizarea termometrului se bazează pe unele presupuneri fizice evidente. Le vom aminti citind cîteva rînduri din prelegerile ţinute acum vreo 150 de ani de către Black, prelegeri cari au contri

buit foarte mult la înlăturarea dificultăţilor ivite în legătură cu noţunile de căldură şi temperatură :
„Servindu-ne de acest instrument am învăţat că, dacă luăm 1 000 sau mai multe feluri (diferite) de materie, ca metale, pietre săruri, lemn, pene, lînă, apă şi diverse alte fluide, care posedă călduri diferite, şi le aşezăm în aceeaşi cameră neîncălzită şi în care nu pătrunde Soarele, cele mai calde dintre aceste corpuri vor transmite căldura lor corpurilor celor mai reci, în cîteva ore, poate într-o zi; dacă după acest timp vom aplica termometrul fiecărui corp succesiv, el va arăta exact acelaşi număr de grade".
Cuvîntul tipărit cursiv „călduri" va trebui înlocuit, după terminologia de azi, prin cuvîntul temperaturi.
Un medic care scoate termometrul din gura unui bolnav ar putea raţiona astfel :
„Termometrul indică temperatura sa proprie prin lungimea coloanei de mercur. Presupunem! că lungimea coloanei de mercur este proporţională cu temperatura. Dar termometrul a stat cîteva minute în contact cu pacientul meu, astfel încît pacientul şi termometrul au aceeaşi temperatură. Conchid că temperatura pacientului meu este identică cu cea indicată de termometru". Probabil că medicul procedează mecanic, totuşi aplică principii fizice fără a fi conştient de aceasta.
Conţine termometrul însă aceeaşi cantitate de căldură ca şi corpul bolnavului ? Desigur că nu. A presupune că două corpuri conţin cantităţi de căldură egale numai pentru faptul că au temperaturi egale, ar însemna, după cum observă Black :
„.., o tratare prea pripită a chestiunii. Aceasta ar însemna să confundăm cantitatea de căldură conţinută în diferite corpuri cu tăria sau intensitatea ei generală, cu toate că, vădit, este vorba despre două lucruri cu totul diferite, care trebuie deosebite ori de cîte ori avem de a face cu distribuţia căldurii".
înţelegem această deosebire cu ajutorul unei experienţe foarte simple. Unui litru de apă încălzit la o flacără de gaz, îi trebuie un timp anumit pentru a trece de la temperatura

camerei la punctul de fierbere. Fireşte că ar dura mult mai mult să încălzim 12 litri de apă în acelaşi vas şi la aceeaşi flacără. Interpretăm acest fapt spunînd că în cazul al doilea este nevoie de o cantitate mai mare din-tp-un anume lucru şi acest „ceva'* îl numim : căldură.

O altă noţiune importantă şi anume cea de căldură specifică, poate fi dobîndită din experienţa următoare : două vase, unul conţinînd 1 kg de apă, celălalt 1 kg de mercur, sînt încălzite amîndouă la fel. Se constată că mercurul se încălzeşte mult mai repede decît apa, şi rezultă că are nevoie de mai puţină „căldură" decît apa pentru a-şi ridica temperatura cu un grad. în general sînt diferite cantităţile de căldură necesare pentru a ridica cu un grad, să spunem de la 10° pină la 11°C, temperatura unor mase egale din substanţe diferite, ca mercurul, fierul, cuprul, lemnul etc. Spunem că fiecare substanţă are căldura sa specifică.
O dată ce am cîştigat noţiunea de „căldură" putem să cercetăm mai de aproape natura sa. Să luăm două corpuri : unul cald şi altul rece, sau mai precis, unul avînd temperatura mai ridicată decît celălalt ; dacă le punem în contact şi eliminăm toate influenţele exterioare, constatăm, după cum ştim, că în cele din urmă ele ajung la aceeaşi temperatură. Cum se produce aceasta ? Ce se petrece între momentul cînd corpurile sînt puse în contact şi momentul cînd temperaturile au ajuns egale ? Imaginea „curgerii" căldurii de la un corp la celălalt, asemenea curgerii apei de la un nivel mai înalt către un nivel mai jos, se impune singură. Această imagine, primitivă, pare a fi compatibilă cu multe fapte, astfel încît se poate stabili următoarea analogie :
apă — căldură
nivel superior — temperatură mai înaltă
nivel inferior — temperatură mai joasă.
Curgerea continuă pînă cînd cele două nivele, adică cele două temperaturi, devin egale. Această imagine naivă poate deveni mai utilă prin consideraţii cantitative. Dacă se amestecă cantităţi determinate de apă şi alcool avînd temperaturi bine definite, dacă se cuntfsc căldurile specifice ale ambelor substanţe, se poate prezice temperatura finală a amestecului. tReciproc, măsurarea temperaturii finale împreună cu puţină algebră, ne dă posibilitatea de a găsi raportul căldurilor specifice ale celor două substanţe.
Recunoaştem în noţiunea de căldură, aşa cum a fost

introdusă aici, o asemănare cu alte noţiuni fizice. Potrivit concepţiei noastre, căldura este o substanţă întocmai ca masa în mecanică. Cantitatea de căldură poate varia sau nu ca şi banii care pot fi cheltuiţi sau încuiaţi într-o casă de bani. Suma închisă într-o casă de bani, rămîne intactă cîtă vreme casa de bani este încuiată ; acelaşi lucru se în-tîmplă cu masa sau cantitatea de căldură a unui corp izolat. Analogul unei astfel de case de bani ar fi un termos ideal. Mai constatăm că, după cum masa unui sistem izolat rămîne neschimbată chiar dacă el este sediul unor transformări chimice, tot astfel şi căldura se conservă chiar atunci cînd curge de la un corp la altul. Chiar dacă nu este folosită căldura la ridicarea temperaturii, ci, de exemplu, la topirea gheţii sau evaporarea apei, putem to-tuşi considera căldura ca o substanţă, întrucit ea poate fi recuperată prin îngheţarea apei, respectiv prin lichefierea vaporilor. Vechii termeni de căldură latentă de topire sau de evaporare, arată că ele sînt scoase din concepţia căldurii ca substanţă. Căldura latentă este ascunsă temporar, asemenea banilor păstraţi în casa de bani, dar ca şi ei este cricînd la dispoziţa noastră, de indată ce cunoaştem secretul broaştei.
Dar, cu siguranţă, căldura nu este o substanţă în acelaşi sens ca masa. Masa poate fi pusă în evidenţă cu ajutorul balanţei ; se poate oare face acelaşi lucru cu căldura ? Cîntăreşte o bucată de fier mai mult cînd este încălzită la roşu decît cînd este rece ca gheaţa ? Experienţa arată că nu. Dacă căldura este o substanţă, atunci ea trebuie să fie fără greutate. Substanţa-calorică era denumită caloric şi este prima noastră cunoştinţă despre o întreagă familie de substanţe fără greutate. în cele ce urmează vom avea prilejul să urmărim istoria acestei familii, înflorirea şi decăderea ei. Deocamdată ne mulţumim să luăm act de naşterea acestui prim membru al ei.
Ţinta oricărei teorii fizice este de a interpreta un cerc cît mai larg de fenomene. Ea se justifică în măsura în care face inteligibile anumite evenimente. Am văzut că teoria

„căldurii-substanţă" explică multe fenomene calorice. Dar, în curînd vom constata că am apucat din nou pe o cale greşită, căci căldura nu poate fi privită ca o substanţa,

fie ea chiar fără greutate. Vom înţelege lesne aceasta dacă ne vom referi la unele experienţe care au marcat începuturile civilizaţiei.
Concepem substanţa ca ceva care nu poate fi nici creat, nici distrus. Totuşi, omul primitiv a produs prin frecare suficientă căldură pentru a aprinde lemnul. Exemplele de producere a căldurii prin frecare sînt mult prea numeroase şi binecunoscute, pentru a mai fi nevoie să le mai citäm. în toate aceste cazuri este creată o anumită cantitate de căldură, fapt greu de explicat prin teoria căldurii-substanţă. Bineînţeles că un adept al acestei teorii ar putea să inventeze argumente în favoarea acestei teorii. Raţionamentul lui ar fi cam astfel : „Teoria substanţei poate explica crearea aparentă de căldură. Să luăm exemplul cel mai simplu : frecăm una de alta două bucăţi de lemn; frecarea influenţează lemnul schim-bîndu-i proprietăţile. Este foarte probabil ca modificarea să se facă astfel încît o cantitate de căldură neschimbată să producă o temperatură mai ridicată decît înainte. în definitiv singurul lucru pe care-1 constatăm este ridicarea temperaturii. Prin urmare, s-ar putea admite că frecarea a schimbat numai căldura specifică a lemnului, nu şi cantitatea totală de căldura".
în această fază a discuţiei a: fi fără rost să argumentăm contra susţinătorului teoriei substanţei, căci problema nu poate fi lămurită decît prin experienţă. Să ne închipuim două bucăţi de lemn identice şi să presupunem că le-am produs variaţii de temperatură egale, prin metode diferite : uneia prin frecare, celeilalte prin contactul cu un radiator. Dacă cele două bucăţi de lemn identice ar avea aceeaşi căldură specifică şi la noua temperatură, atunci întreaga teorie a substanţei s-ar prăbuşi. Există metode foarte simple pentru determinarea căldurii specifice, iar soarta teoriei depinde tocmai de rezultatul acestor măsurări.
Probele capabile să decidă asupra vieţii sau morţii unei teorii se întilnesc adesea în istoria fizicii şi sînt numite experienţe cruciale. Valoarea crucială a unei experienţe se relevă numai prin modul cum este formulată chestiunea, şi numai o singură teorie poate fi verificată

de ea. Determinarea căldurii specifice a două corpuri de acelaşi fel, aduse la aceeaşi temperatură, unul prin frecare, celălalt prin flux de căldură, este un exemplu tipic de experienţă crucială. Ea a fost efectuată acum vreo 150 de ani de către Rumford şi a dat lovitura de graţie teoriei „căldurii-substanţă".
Dăm mai jos un extras din expunerea lui Rumford însuşi, în care se descrie mersul experienţei :
,„Se întîmplă deseori că în cursul treburilor şi ocupaţiilor curente să ni se ofere, de la sine, ocazii favorabile de a contempla operaţii dintre cele mai curioase ale naturii; experienţe fizice foarte interesante pot fi adesea efectuate fără dificultate şi cheltuială cu ajutorul maşinilor inventate pentru simpla satisfacere a nevoilor industriei.
Am avut deseori ocazia să fac această observaţie şi am ajuns la convingerea că obiceiul de a păstra ochii deschişi la tot ceea ce se întîmplă în viaţa de toate zilele, conduce adesea, ca din întîmplare, sau prin jocul neastîmpărat al fanteziei pusă în acţiune de observarea fenomenelor celor mai banale, la îndoieli folositoare şi proiecte judicioase de cercetare şi îmbunătăţire, mai repede ca meditaţiile cele mai intense ale filosofilor în metalice desprinse de burghiu.
Trebuind, în ultima vreme, să supraveghez fabricarea ţevilor de tun în atelierele arsenalului militar din Munchen, am fost izbit de considerabilul grad de căldură dobîndit în scurt timp de un tun de alamă, cînd era găurit, şi de căldura (mult mai mare decît a apei care fierbe, cum am stabilit experimental) strunjiturii metalice desprinse de burghiu.
De unde provine căldura produsă prin operaţia mecanică menţionată mai sus ?
Este ea oare furnizată de către strunjitura desprinsă de burghiu din masa solidă a metalului ?
Dacă ar fi aşa, atunci potrivit teoriilor moderne despre căldura latentă şi despre caloric, nu numai că s-ar fi schimbat căldura specifică a strunjiturii, dar această schimbare ar fi trebuit chiar să fie atît de mare încît să justifice toată căldura produsă.

Or, nici o astfel de schimbare nu s-a produs căci luînd cantităţi de greutate egală de strunjitura şi de bucăţi mici din acelaşi bloc de metal, tăiate cu un ferăstrău fin, şi aducîndu-le la aceeaşi temperatură (a apei care fierbe) şi introducîndu-le în cantităţi egale de apă rece (a cărei temperatură era de 591/2°F1), apa în care fusese aruncată strunjitura, după toate aparenţele, nu s-a încălzit nici mai mult nici mai puţin decît apa în care au fost puse bucăţile de metal.
*) Adică 15,3°C. N. Red. E. T.

Iată concluzia lui finală :
Reflectînd asupra acestei chestiuni, nu avem voie să uităm împrejurarea extrem de remarcabilă că izvorul căldurii născute prin frecare, în aceste experienţe, s-a dovedit, în mod manifest, a fi inepuizabil.
Aproape că este de prisos să adăugăm că ceea ce un corp izolat sau un sistem de corpuri izolate poate furniza nelimitat nu poate fi niciodată o substanţă materială; şi exceptînd mişcarea, mi se pare extrem de greu, pentru a nu spune complet imposibil, să ne facem o imagine clară despre ceva ce poate fi generat şi transmis în felul în care a fost generată şi transmisă căldura în aceste experienţe".
Vedem astfel că vechea teorie se prăbuşeşte sau mai exact vedem că teoria „căldurii-substanţă" trebuie sa fie limitată numai la problemele fluxului de căldură. Iarăşi, după cum ne-a sugerat Rumford. trebuie căutată o nouă idee conducătoare. Pentru aceasta vom lăsa deocamdată in suspensie problema căldurii şi ne vom întoarce la mecanică.

§ 7. MONTAGNES RUSSES

Să urmărim acum puţin mişcarea vagonetului pe mon-tagnes-ii russes, acest popular izvor de senzaţii tari. Este vorba de un mic vagonet, ridicat sau tras pînă la punctul cel mai înalt al traseului. Lăsat liber, el lunecă întîi la vale o bucată, sub acţiunea forţei de gravitaţie, apoi începe să se urce şi să coboare o pantă şerpuită în modul cel mai capricios, dînd celor instalaţi în el, fiorul variaţiei bruşte de viteză. Punctul cel mai înalt al traseului este locul de pornire. în tot cursul mişcării, vagonetul nu mai atinge niciodată această înălţime (fig. 20). O descriere completă a acestei mişcări ar fi foarte complicată. Pe de o parte ar trebui considerată latura mecanică a problemei, variaţiile in timp ale vitezei şi poziţiei. Pe de altă parte, frecarea şi deci producerea căldurii în şine şi roţi. Singura justificare valabilă a descompunerii fenomenului fizic în aceste două aspecte este posibilitatea de a face uz de noţiunile tratate anterior. Descompunerea aceasta conduce din nou la o experienţă idealizată, căci un feno

men fizic, în cursul căruia să apară numai aspectul mecanic, poate fi imaginat, nu însă şi realizat.
Pentru experienţa idealizată, ne putem imagina pe cineva care a ajuns să elimine complet frecarea care în-
Fig. 19.
soţeşte totdeauna mişcarea. El se hotărăşte să aplice descoperirea sa la construirea de montagnes russes şi să caute singur mijlocul de realizare. Vagonetul care, în punctul de plecare, se află la înălţimea de 30 m deasupra
Fig. 20.
Pămîntului trebuie să urce şi să coboare. După cîteva încercări, el găseşte o regulă simplă de urmat : este liber să aşeze şinele oricum, cu condiţia ca nici un punct să nu întreacă înălţimea punctului de plecare (fig. 19). Dacă vagonetul va merge liber pînă la căpătui cursei, el va putea atinge, ori de cîte ori, înălţimea de 30 m, dar nu o va>

putea depăşi niciodată. înălţimea iniţială nu va fi atinsă niciodată pe o cale ferată reală, din cauza frecării ; dar inginerul nostru ipotetic nu trebuie să ţină seama de acest lucru.
Să urmărim acum mişcarea vagonetului idealizat pe montagnes-ii russes în condiţii ideale, începînd din momentul cînd coboară din punctul cel mai înalt. Pe măsură ce înaintează, înălţimea sa deasupra solului scade, dar viteza sa creşte. Afirmaţia aceasta ne aminteşte, la prima vedere, o frază intîlnită în exerciţiile de traducere : „eu nu am creion, dar tu ai şase portocale44. Ea nu este însă chiar atît de stupidă. între împrejurarea că eu nu am creion şi faptul că altcineva are şase portocale nu este nici o

legătură dar, între înălţimea vehiculului deasupra solului şi viteza lui există o corelaţie foarte reală. Putem chiar să calculăm în fiecare moment viteza vagonetului, dacă ştim la ce înălţime, se află deasupra solului ; vom trece însă peste această chestiune, deoarece ea are un caracter cantitativ, care poate fi exprimat cel mai bine prin formule matematice.
în punctul cel mai înalt al traiectoriei sale, adică la 30 m de la sol, viteza vagonetului este egală cu zero. în punctul cel mai de jos el este la nivelul solului şi are viteza cea mai mare. Aceste fapte pot fi exprimate şi altfel : în punctul cel mai înalt al traiectoriei sale, vagone-tul are energie potenţială, dar nu are energie cinetică sau energie de mişcare. în punctul cel mai jos, el are energia cinetică cea mai mare, dar nici o energie potenţială. în toate poziţiile intermediare, unde fiecărei înălţimi îi corespunde şi o viteză, vagonetul are atît energie cinetică, cît şi energie potenţială. Energia potenţială creşte cu înălţimea, în timp ce energia cinetică creşte pe măsură ce creşte viteza. Principiile mecanicii sînt suficiente pentru a explica această mişcare. în descrierea matematică apar două expresii pentru energie, amîndouă variabile, dar a căror sumă rămîne constantă. Astfel se pot introduce, riguros (matematic), pe de o parte noţiunea de energie potenţială care depinde de poziţie, iar pe de altă parte cea de energie cinetică care este funcţie de viteză. Introducerea acestor doi termeni este de fapt arbitrară şi nu se justifică decît prin consideraţii de comoditate. Suma ce

lor două mărimi rămîne neschimbată şi reprezintă o constantă a mişcării. Energia totală, cea cinetică plus cea potenţială, poate fi comparată de exemplu cu nişte bani, a căror sumă rămîne intactă, pe care-i preschimbăm însă la un curs bine stabilit dintr-o valută în alta, de exemplu, din dolari în lire sterline şi invers.
în condiţiile reale, în care frecarea împiedică vagonetul să mai atingă o înălţime egală cu cea de la care a plecat, are loc de asemenea o trecere necontenită a energiei cinetice în cea potenţială şi invers. Aici însă suma lor nu rămîne constantă, ci scade. Este necesar acum să facem un nou pas important şi îndrăzneţ pentru a stabili corelaţia dintre aspectele mecanice şi cele calorice ale mişcării. Bogăţia de consecinţe şi generalizări după acest pas, o vom vedea mai tîrziu.
Este acum implicată în mişcare, pe lîngă energia cinetică şi energia potenţială, şi căldura produsă prin frecare. Corespunde această 'căldură descreşterii energiei mecanice, adică celei cinetice sau celei potenţiale ? Se impune o nouă ipoteză : Dacă vom considera căldura ca o formă a energiei, poate că suma celor trei energii : căldură, energie cinetică şi potenţială, rămîne constantă. Cu alte cuvinte, nu căldura siagură, ci căldura împreună cu alte forme de energie ar fi indestructibilă, asemenea unei substanţe. Adică, lucrurile s-ar petrece ca şi cum un om ar trebui să-şi plătească lui însuşi un comision în franci pentru schimbarea dolarilor în lire sterline şi ar economisi această sumă, astfel, încît suma dolarilor, lirelor şi francilor să constituie un total fix conform cu un anumit curs al valorilor.
Progresul ştiinţific a distrus vechiul concept de căldură ca substanţă. în locul ei, să încercăm a introduce o nouă substanţă, energia, căldura fiind numai o formă a ei.

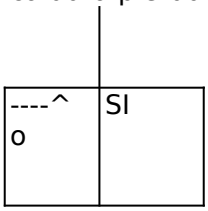
§ 8. RAPORTUL DE TRANSFORMARE

Mai puţin cu o sută de ani în urmă, noua descoperire care a condus la conceptul de căldură ca formă a energiei a fost indicată de Mayer şi confirmată experimental

de Joule. Este o stranie coincidenţă că aproape toate cercetările fundamentale privitoare la natura căldurii au fost făcute de către fizicieni neprofesionişti care considerau fizica numai ca o distracţie preferată. Aceştia au fost : multilateralul scoţian Black, medicul german Mayer şi marele aventurier american, contele de Rumford care mai tîrziu a trăit în Europa şi, între altele, a ocupat postul de ministru de război al Bavariei. Să nu-1 uităm şi pe fabricantul de bere, englezul Joule, care în timpul său liber a făcut experienţe dintre cele mai importante privitoare la conservarea energiei.
Joule a verificat, prin experienţă, ipoteza potrivit căreia căldura este o formă a energiei şi a determinat raportul de transformare. Merită să ne ocupăm puţin de rezultatele la care a ajuns el.

Energia cinetică şi energia potenţială ale unui sistem, la un loc, constituie energia lui mecanică. Cînd am vorbit despre montagnes-ii russes am făcut ipoteza că o parte din energia mecanică s-ar transforma în căldura* Dacă ar fi aşa, atunci nu numai pentru acest proces ci şi pentru toate procesele fizice asemănătoare, ar trebui să existe un raport de transformare bine definit, un curs bine stabilit la care să se facă transformarea energiei mecanice in căldură. Aceasta este o chestiune cantitativă, dar faptul că o cantitate dată de energie mecanică se poate transforma intr-o cantitate anumită de căldură este de importanţă capitală. Voim să ştim care este numărul ce exprimă raportul de transformare, cu alte cuvinte cantitatea de căldură ce se poate obţine dintr-o cantitate dată de energie mecanică.
Determinarea acestui număr a făcut obiectul cercetărilor lui Joule. Dispozitivul de care s-a folosit în una din experienţele sale se aseamănă foarte mult cu o pendulă (fig. 21). O astfel de pendulă se remontează prin ridicarea a două greutăţi, comunicîndu-se astfel energie potenţială sistemului. Dacă nu mai intervenim apoi în mecanismul ceasului, el poate fi considerat un sistem închis. Greutăţile coboară lent şi ceasul merge. După un timp anumit, greutăţile vor atinge poziţia lor cea mai de jos şi ceasul se va opri. Ce s-a întîmplat cu energia ?

Energia potenţială a greutăţilor s-a transformat în energia cinetică a mecanismului, risipindu-se apoi treptat sub formă de căldură.
O modificare convenabilă a unui astfel de mecanism a permis lui Jcule să măsoare căldura pierdută şi să determine astfel raportul de transformare. La aparatul său



A
Fig. 21
două greutăţi făceau să se rotească o roată cu palete cufundate în apă. Energia potenţială a greutăţilor era transformată în energia cinetică a părţilor mobile ale aparatu-lui, apoi în căldură, care ridica temperatura apei. Joule măsura variaţia de temperatură şi apoi, pe baza căldurii specifice cunoscute a apei, calcula cantitatea de căldura absorbită.
iRezultatele numeroaselor sale experienţe le-a rezumat după cum urmează :
1. Cantitatea de căldură produsă prin frecarea corpurilor solide sau lichide este întotdeauna proporţională cu cantitatea de forţă cheltuită (prin forţă, Joule înţelegea energie).
2. Cantitatea de căldură capabilă să ridice cu 1° Fahrenheit (0,56°C) temperatura unei livre engleze de apă (cintărită în vid şi luată între 55°—60° Fahrenheit adică între 13° şi 16°C) necesită pentru producerea sa cheltuirea unei forţe mecanice (a unei energii) reprezentată de căderea a 772 livre engleze (^ 350 kg) pe distanţa de un picior (30,48 cm).

Cu alte cuvinte : energia potenţială a 772 livre„ ridicate la înălţimea de un picior de la Pămînt, ar fi echivalentă cu cantitatea de căldură necesară pentru a încălzi o livră de apă de la 55° pînă le 56° Fahrenheit. Experimentatorii care au urmat au fost capabili să atingă o precizie mai mare, dar echivalentul mecanic al căldurii este, în esenţă, cel stabilit de către Joule în opera sa de pionier.
O dată realizată această importantă operă, progresul a fost deosebit de rapid. S-a recunoscut curînd dă energia mecanică şi cea calorică reprezintă numai două din multele forme pe care le poate lua energia. Tot ce se poate transforma în una din aceste două forme de energie este de asemenea o formă a energiei. Astfel, ra-« diaţia emisă de Soare este energie deoarece ea se transformă, parţial, în căldură pe Pămînt. Un curent electric are energie căci el încălzeşte un fir metalic sau face să se invîrtească roţile unui motor. Cărbunele conţine energie chimică ce poate fi pusă în libertate, prin ardere* sub formă de căldură. în toate fenomenele din natură, energia se transformă dintr-o formă în alta şi

anume totdeauna potrivit unui raport de transformare bine definit. Intr-un sistem închis, adică ferit de orice influenţă exterioară, energia se conservă, comportindu-se astfel ca şi o substanţă. Suma tuturor formelor de energie posibile, care ar interveni într-un astfel de sistem, este constantă, chiar dacă fiecare specie de energie, în parte, ar varia cantitativ. Privind întregul Univers ca un singur sistem închis, putem proclama cu mîndrie, alături de fizicienii secolului al XlX-lea, că energia Universului este invariantă, că nici o părticică din ea nu ar putea fi vreodată creată sau distrusă.
Avem acum două concepte de substanţă : materia şi energia. Amîndouă se supun legilor de conservare : într-un sistem izolat nu poate varia nici masa şi nici energia sa totală. Materia are greutate, energia este imponderabilă. Avem deci două noţiuni diferite şi două legi de conservare distincte. Ne mai putem declara astăzi adenţiî acestor idei ? Sau, în lumina progreselor recente, această reprezentare, în aparenţă bine întemeiată, n-a fost modifi
Ascensiunea concepţiei mecaniciste
20
cată ? Ei bine, ea a fost modificată ! Transformările ulterioare ale acestor două noţiuni sînt legate de teoria relativităţii ; asupra acestui punct vom reveni mai tîrziu.
§ 9. CONCEPŢIILE FILOSOFICE
Foarte des rezultatele cercetărilor ştiinţifice impun schimbarea punctului de vedere filosofic asupra unor probleme care depăşesc cu mult cadrul restrîns al .ştiinţei însăşi. Care este obiectivul ştiinţei ? Ce i se pretinde unei teorii care încearcă să descrie natura ? Aceste chestiuni, deşi depăşesc cadrul fizicii, sînt totuşi strîns legate de ea, căci ştiinţa procură materialul, din care ele izvorăsc. Generalizările filosofice trebuie să fie bazate pe rezultate ştiinţifice. O dată formulate şi larg acceptate, ele influenţează foarte des, la rindul lor, evoluţia ulterioară a gîndirii ştiinţifice, indicînd una din numeroasele direcţii de dezvoltare posibile. Revolta încununată de succes împotriva unei concepţii dominante are ca rezultat dezvoltări neprevăzute şi inedite, care devin o sursă de noi aspecte filosofice. Aceste observaţii sînt inevitabil vagi şi fără conţinut, atîta vreme cît nu le ilustrăm cu exemple din istoria fizicii.
Să încercăm acum să expunem primele idei filosofice asupra obiectivelor ştiinţei. Aceste idei au continuat să influenţeze puternic dezvoltarea fizicii pînă acum aproape 100 de ani, cînd au fost părăsite în virtutea noilor legi şi teorii care au alcătuit la rîndul lor un nou cadru pentru ştiinţă.
In toată istoria filosofiei, începînd cu filosofia greacă şi terminînd cu fizica modernă, s-au remarcat încercările constante de a reduce complexitatea aparentă a fenomenelor naturii la cîteva idei şi relaţii fundamentale simple. Principiul acesta stă la baza oricărei filosofii naturale. El este exprimat încă în opera atomiştilor. Astfel, Democrit scria în urmă cu 23 de secole :
„Prin convenţie dulcele este dulce, prin convenţie amarul este amar, prin convenţie caldul este cald, prin convenţie recele este rece, prin convenţie culoarea este culoare. Dar în realitate există
•20
Evoluţia fizicii
atomi şi vid. Adică obiectele simţurilor sînt presupuse reale şi se obişnuieşte să fie privite ca atare, dar ele nu sînt cu adevărat. Numai atomii şi vidul sînt reali".
în filosofia antică, această idee nu întrece caracterul unei ficţiuni a imaginaţiei. Legi ale naturii care să stabilească o corelaţie între evenimentele care se succed erau necunoscute Grecilor. O ştiinţă care să lege teoria cu experienţa a început cu opera lui Galileu. Fînă acum am urmat primele idei conducătoare, ce au condus la legile mişcării. De-a lungul a două sute de ani de cercetare ştiinţifică, forţa şi materia au fost noţiunile de bază ale oricărei încercări de a înţelege natura. Este cu neputinţă să ne-o reprezentăm pe una fără cealaltă, întrucît materia îşi manifestă existenţa numai ca izvor al unei forţe prin acţiunea ei asupra altei materii.
Să luăm exemplul cel mai simpu : două particule, între care se exercită forţe. Forţele, pe care ni le putem
reprezenta cel mai uşor, sînt cele Atracţie de atracţie sau de respingere. în _j^. -<_ ambele cazuri vectorii forţă sînt si-
• $ tuaţi în lungul liniei care uneşte
cele două puncte materiale. Cerinţa

simplicităţii este cea care conduce Respingem la imaginea unor particule care se
^- -^ $ atrag sau se resping reciproc (fig.
Fig. 22 22) ; orice altă ipoteză, cu privire la
direcţia forţelor care ar acţiona, ar duce la o imagine considerabil mai complicată. Putem oare face o presupunere tot atît de simplă cu privire la lungimea vectorilor forţă ? Chiar dacă dorim să evităm ipotezele prea particulare, putem totuşi adopta presupunerea că forţa ce acţionează între două particule date depinde, ca şi atracţia gravitaţională, numai de distanţa dintre ele. Aceasta este destul de simplu. S-ar putea imagina forţe mult mai complicate, de exemplu forţe care să depindă nu numai de distanţa dintre particule, ci şi de viteza lor. Cu materia şi forţa, drept concepte fundamentale, am putea cu greu imagina ipoteze mai simple decît aceea că forţa acţionează în lungul liniei ce uneşte cele două particule şi depinde numai de distanţă. Este
Ascensiunea concepţiei mecaniciste
21
— într-adevăr — posibil să se descrie toate fenomenele fizice exclusiv cu ajutorul unor forţe de tipul acesta ?
Marile realizări ale mecanicii în toate ramurile ei, succesul răsunător obţinut de ea în dezvoltarea astronomiei, aplicarea ideilor ei la probleme net diferite şi neavînd un caracter mecanic, au făcut să apară credinţa că este posibil să se descrie absolut toate fenomenele naturale prin jocul unor forţe simple, care s-ar exercita între obiecte invariabile. De-a lungul a două secole care au urmat perioadei lui Galileu, tendinţa aceasta conştientă sau inconştientă se manifestă aproape in toate creaţiile ştiinţifice. Aceasta a fost formulată foarte limpede, către mijlocul secolului al XIX-lea, de Helmholz :
„în sfîrşit descoperim totuşi că problema ştiinţei fizice consistă în a reduce fenomenele naturale la forţe invariabile de atracţie şi de repulsie, a căror intensitate depinde de distanţă.
Soluţia acestei probleme este condiţia unei înţelegeri complete a naturii".
Astfel, după Helmholz, linia dezvoltării ştiinţei este deci determinată şi urmează un curs riguros fix :
„Misiunea ei va fi îndeplinită pe măsură ce reducerea fenomenelor naturii la forţe simple va fi deplină şi va face dovada că reducerea aceasta este singura de care sînt capabile fenomenele".
Unui fizician din secolul al XX-lea, concepţia aceasta ii apare simplistă şi naivă. El s-ar îngrozi la gîndul că marea aventură a cercetărilor s-ar putea curma atît de curînd şi că o imagine dezolantă a Universului, deşi infailibilă, s-ar putea instaura pentru vecie.
Cu toate că această doctrină ar vrea să reducă descrierea tuturor fenomenelor la forţe simple, totuşi ea lasă deschisă problema felului în care forţele ar depinde de distanţă. S-ar putea ca această dependenţă să difere de ia fenomen, la fenomen. Dar necesitatea de a introduce multe tipuri diferite de forţe, pentru diferitele fenomene este, fără îndoială, nesatisfăcătoare din punctul de vedere filosofic. Totuşi, concepţia mecanicistă, formulată în modul cel mai categoric de către Helmholz, a jucat la timpul
-C — Evoluţia fizicii
21
Evoluţia fizicii
ei un rol însemnat. Dezvoltarea teoriei cinetice a materiei este una din cuceririle cele mai mari influenţată direct de concepţia mecanicistă.
înainte de a asista la declinul concepţiei mecaniciste să acceptăm provizoriu punctul de vedere al fizicianului din secolul trecut, trăgînd împreună cu el concluziile ce decurg din imaginea sa asupra lumii exterioare.
§ 10. TEORIA CINETICA A MATERIEI
Este oare posibilă explicarea fenomenelor calorice ca urmare a mişcării unor particule care acţionează una asupra alteia cu forţe simple ? Un vas închis conţine o cantitate anumită de gaz, de exemplu aer, la o temperatură determinată. încălzindu-1 ii ridicăm temperatura şi-i mărim energia. Cum este legată încălzirea de mişcare ? Posibilitatea unei astfel de legături ne este sugerată atît de punctul nostru de vedere filosofic, acceptat provizoriu, cît şi de modul în care se produce căldura prin mişcare. Căldura trebuie să fie o energie mecanică, dacă orice problemă este de natură mecanică. Obiectul teoriei cinetice este de a prezenta conceptul de materie tocmai sub acest aspect. Potrivit acestei teorii, un gaz reprezintă o îngrămădire de enorm de multe

particule sau molecule, care se mişcă în toate direcţiile, ciocnindu-se între ele şi schimbîndu-şi direcţia de mişcare după fiecare ciocnire. Trebuie să existe o viteză medie pentru molecule, după cum într-o mare comunitate de oameni se poate stabili o vîrstă medie sau un avut mediu. Prin urmare, trebuie să existe şi o energie cinetică medie pe particulă. Mai multă căldură în vas înseamnă o mai mare energie cinetică medie a particulelor din el. Prin urmare, potrivit a-cestei imagini, căldura nu este o formă specială de energie diferită de cea mecanică, ci este tocmai energia cinetică a mişcării moleculelor. Fiecărei temperaturi determinate ii corespunde deci o energie cinetică medie pe moleculă. Aceasta nu este, în adevăr, o ipoteză arbitrară. Sîntem obligaţi să privim energia cinetică a unei molecule drept măsura temperaturii unui gaz, dacă voim

să ne formăm o imagine mecanică conştientă despre materie.
Această teorie este mai mult decît un joc al imaginaţiei. Se poate dovedi că teoria cinetică a gazelor nu numai că concordă cu experienţa, ci că ea conduce efectiv la o înţelegere mai profundă a faptelor. Să ilustrăm a-ceasta cu cîteva exemple.
Să Considerăm un vas închis cu un piston care se poate mişca liber (fig. 23). Vasul conţine o anumită cantitate de gaz care trebuie menţinută la temperatură constantă. Dacă iniţial pistonul este în repaus într-o anumită poziţie, micşorîndu-i sarcina el se va deplasa în sus, dar mărindu-i-o se va mişca în jos. Deci, pentru a apăsa pistonul în jos, trebuie să-i aplicăm o forţă care să învingă presiunea din interiorul gazului. Care este mecanismul prin care ia naştere această presiune după teoria cinetică ? Un număr enorm de particule care alcătuiesc gazul se mişcă în toate direcţiile. Ele bombardează pereţii şi pistonul şi sar înapoi întocmai ca nişte mingi aruncate de perete. Bombardamentul acesta neîntrerupt al unui mare număr de particule ţine pistonul la o anumită înălţime, opu-nîndu-se forţei de gravitaţie care acţionează, în jos, asupra pistonului şi asupra greutăţilor. într-un sens acţionează forţa gravitaţională constantă, în sensul celălalt ne-numărate lovituri neregulate, imprimate de molecule. Pentru ca echilibrul să se menţină, efectul rezultant exercitat asupra pistonului de mulţimea acestor mici forţe neregulate, trebuie să fie egal cu cel al greutăţii (fig. 23).
Să presupunem că pistonul este apăsat în jos, com-primînd gazul pînă la o anumită fracţiune a volumului iniţial, de exemplu pînă la jumătatea lui, temperatura fiind însă păstrată neschimbată. Ce trebuie să urmeze

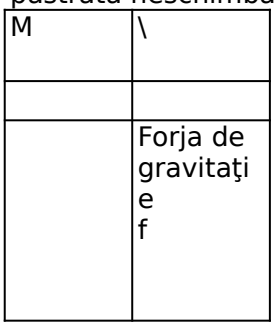


Fig. 23

după teoria cinetică? Forţa produsă de bombardament ar urma să fie mai intensă sau mai puţin intensă ? Particulele sînt acum mai înghesuite. Deşi energia cinetică medie a rămas aceeaşi, ciocnirile particulelor asupra pistonului se vor produce mai des ca înainte, astfel că forţa totală va creşte. Din această imagine a teoriei cinetice reiese limpede că pentru a menţine pistonul într-o poziţie mai joasă este nevoie de o greutate mai mare.
Acest fapt experimental simplu este bine cunoscut, dar previziunea sa rezultă în mod logic din concepţia cinetică a materiei.
Să considerăm un alt dispozitiv experimental. Să luăm două vase cu volume egale, care conţin gaze diferite, de exemplu unul hidrogen şi celălaH) azot, ambele la aceeaşi temperatură. Presupunem că cele două vase sînt închise cu pistoane identice şi încărcate cu greutăţi egale. Pe scurt, aceasta înseamnă că gazele au acelaşi volum, sînt la aceeaşi temperatură şi suportă aceeaşi presiune. Deoarece temperatura este aceeaşi, energia

cinetică medie, pe particulă, conform teoriei, este aceeaşi. Şi întru-cit presiunile sînt egale, cele două pistoane vor suporta aceeaşi forţă totală. In medie, fiecare particulă transportă aceeaşi energie, iar cele două vase avînd acelaşi volum, numărul de molecule trebuie să fie acelaşi în fiecare vas, cu toate că gazele sînt chimic diferite. Rezultatul acesta extrem de important permite înţelegerea multor fenomene chimice. Semnificaţia lui este ca numărul moleculelor Conţinute într-un volum dat, la o anumită temperatură şi la o presiune anumită, este o mărime caracteristică nu numai pentru un gaz anumit, ci pentru toate gazele. Este foarte surprinzător că teoria cinetică nu se mărgineşte numai să prezică existenţa unui astfel de număr universal, ci permite şi determinarea lui exactă. Vom reveni îndată asupra acestei chestiuni.
Teoria cinetică a materiei explică, atît cantitativ cit şi calitativ, legile gazelor găsite pe cale experimentală. Afară de aceasta, aplicabilitatea ei nu este limitată la gaze, cu toate că în domeniul lor ea a obţinut succesele cele mai mari.
Un gaz poate fi lichefiat prin coborîrea temperaturii.

Scăderea temperaturii unui corp echivalează cu scăderea energiei cinetice medii a particulelor lui. Este deci limpede că energia cinetică a unei particule lichide este mai mică decît cea a unei particule gazoase corespunzătoare.
O manifestare remarcabilă a mişcării particulelor în lichide a fost descoperită, pentru prima oară, în aşa-numita mişcare browniană, fenomen remarcabil care ar fi rămas misterios fără teoria cinetică a materiei. Această mişcare a fost observată pentru prima oară de botanistul Brown şi explicată mai tîrziu cu 80 de ani, către începutul secolului nostru. Singurul instrument necesar pentru observarea mişcării browniene este microscopul care nici măcar nu este necesar să fie prea puternic.
Brown lucrase cu grăunţe de polen ale anumitor plante, adică, după spusele sale, cu „... particule sau granule neobişnuit de mari, variind în lungime între unu pe patru mii şi cam unu pe cinci mii dintr-un ţol".
Mai departe el povesteşte :
„în timp ce cercetam forma acestor particule, cufundate în apă, am observat că multe dintre ele erau evident în mişcare. ...Aceste mişcări au fost de aşa natură încît, după observaţii repetate, să mă ducă la convingerea că ele nu ar putea fi cauzate nici de curenţi în sînul lichidului, nici de o evaporare treptată a lui, ci că ele aparţin particulelor înseşi".
Ceea Ce a observat Brown, a fost o agitaţie neîntreruptă, de care erau cuprinse toate granulele în suspensie în apă, mişcare vizibilă la microscop. A fost un spectacol emoţionant !
Este alegerea specială a plantelor ceva esenţial pentru fenomen ? Brown a răspuns la această întrebare repetind experienţa cu polenul multor plante diferite şi a găsit că toate granulele, dacă erau destul de mici, prezentau o asemenea mişcare cînd erau în suspensie în apă. Mai departe, a pus în evidenţă aceeaşi mişcare dezordonată şi neîncetată şi la particule foarte mici, atît ale unor substanţe organice cît şi anorganice. Chiar cu pulberea provenită dintr-un fragment al unui sfinx a observat acelaşi fenomen.

Care poate fi explicaţia acestei mişcări ? Ea pare în contrazicere cu toate experienţele anterioare. înregistrarea, să zicem din 30 în 30 de secunde, a poziţiilor unei particule ne dă o traiectorie de formă fantastică. Lucrul cel mai uluitor este caracterul, după cît se pare, etern al mişcării. Un pendul oscilant introdus în apă se opreşte în scurt timp dacă nu este întreţinut de o forţă exterioară oarecare. Existenţa unei mişcări care nu încetează niciodată pare contrarie oricărei experienţe. Dificultatea aceasta a fost lămurită în mod strălucit de teoria cinetică a materiei.
Cercetînd, apa, chiar cu microscoapele noastre cele mai puternice, nu vom observa totuşi molecule sau mişcarea lor, aşa cum şi-o reprezintă teoria cinetică a materiei. Trebuie deci să tragem concluzia că, dacă apa este cu adevărat o îngrămădire de particule, atunci dimensiunile lor sînt aşa de mici încît, particulele nu pot fi văzute nici chiar cu cele mai bune microscoape. Să-i acordăm încredere teoriei norstre continuînd să adimtem că ea reprezintă! o imagine consecventă a realităţii. Particulele browniene, vizibile la microscop, sînt bombardate de către particulele şi mai mici care alcătuiesc apa însăşi.

Mişcarea browniană există numai dacă particulele bombardate sînt destul de mici. Ea se produce datorită faptului că bombardamentul nu este uniform din toate părţile şi nu se poate calcula o valoare medie din cauza caracterului său dezordonat şi întîmplător. Mişcarea browniană este deci rezultatul unei mişcări neobservabile. Comportarea particulelor mari oglindeşte întrucitva comportarea moleculelor înseşi şi reprezintă, ca să spunem aşa, o amplificare atît de puternică a mişcării încît ea devine observabilă la microscop. Caracterul neregulat de zig-zag întîmplător al drumului parcurs de particulele browniene oglindeşte o neregularitate asemănătoare a traiectoriilor particulelor mai mici, care constituie materia, înţelegem astfel, că un studiu cantitativ al mişcării browniene ne va permite să pătrundem mai adînc în teoria cinetică a materiei. Este evident că mişcarea browniană vizibl depinde de mărimea particulelor invizibile care efectuează bombardamentul. N-ar exista nici o miş-

PLANŞA I

(Fotografiate de J. PERRIN)

Particule în mişcare browniană, văzute la microscop.

(Fotografiată de Brumberg şi Vavilov)

O particulă în mişcare browniană fotografiată după o expunere de lungă durată, acoperind o suprafaţă.

Poziţiile succesive ale unei particule in mişcare browniană, văzută la microscop. Drumul mediu, corespunzător poziţiilor succesive ale particulei.

care browniană, dacă moleculele bombardante nu ar avea o anumită energie sau, cu alte cuvinte, dacă n-ar avea masă şi viteză. De aceea, nu trebuie să ne mire că studierea mişcării browniene poate conduce la determinarea masei unei molecule.

Prin cercetări laborioase, atît teoretice cît şi experimentale, au fost precizate aspectele cantitative ale teoriei cinetice. Calea deschisă de mişcarea browniană este una dintre acelea care au dus la rezultate cantitative. Aceleaşi date cantitative pot fi insă obţinute pe diferite căi avînd puncte de plecare cu totul diferite. Faptul că toate aceste metode confirmă această concepţie este de cea mai mare importanţă căci dovedeşte consistenţa internă a teoriei cinetice a materiei.

Vom: cita numai unul din multele rezultate cantitative, obţinute prin experienţă şi teorie. Să presupunem că avem un gram din elementul cel mai uşor, adică un gram de hidrogen şi ne întrebăm cîte particule sînt conţinute |n acest gram. Răspunsul nu va fi caracteristic numai pentru hidrogen, ci şi pentru toate celelalte gaze, căci ştim în ce condiţii două mase de gaz conţin acelaşi număr de particule.

Teoria ne permite să răspundem la această chestiune servindu-ne de anumite măsurări efectuate asupra mişcării browniene a unei particule în suspensie. 'Rezultatul este un număr neînchipuit de mare : un trei urmat de 23 de cifre î Un gram de hidrogen conţine 303 000 000 000 000 000 000 000 molecule.

Să ne imaginăm moleculele unui gram de hidrogen mărite deajuns pentru a deveni vizibile la microscop, adică diametrul să devină de cinci miimi de milimetru, cît al unei particule browniene. Pentru a le împacheta lipite una de alta am avea atunci nevoie de o ladă cu laturile cam de 400 m.

Putem calcula uşor masa unei asemenea particule de hidrogen, împărţind numărul unu prin numărul de mai sus. Cîtul este un număr inimaginabil de mic :

0,000 000 000 000 000 000 000 003 3 grame, reprezentând masa unei molecule de hidrogen.

Experienţele asupra mişcării browniene sînt numai

o parte dintre multiplele experienţe, independente, care conduc la determinarea acestui număr care joacă un roi atît de important în fizică.

In toria cinetică a materiei, precum şi în toate cuceririle ei însemnate, vedem realizarea unui anumit program filosofic general : reducerea explicării tuturor fenomenelor la interacţiunea particulelor de materie.

In rezumat :

în mecanică traiectoria viitoare a unui corp în mişcare poate fi prevăzută, iar cea trecută determinată, dacă îi cunoaştem condiţia prezentă şi forţele care-l solicită, Astfel, de

exemplu, pot fi prevăzute traiectoriile viitoare ale tuturor planetelor. Forţele active sînt forţele de gravitaţie ale lui Newton, care depind numai de distanţa. Marile rezultate ale mecanicii clasice sugerează că, concepţia mecanicistă poate să fie aplicată consecvent in « toate ramurile fizicii, că toate fenomenele pot fi explicate prin acţiunea forţelor de atracţie şi de repulsie, care depind numai de distanţă şi care se exercită între particule invariabile.
In teoria cinetică a materiei vedem cum acest punct de vedere, rezultat din problemele mecanice, îmbrăţişează fenomenele calorice şi conduce la o imagine fecundă a structurii materiei.
II. DECLINUL CONCEPŢIEI MECANICISTE-
Cele două fluide electrice. — Fluidele magnetice. — Frima dificultate serioasă. — Viteza luminii. — Lumina ca substanţă. — Enigma culorii. — Ce este o undă ? — Teoria ondulatorie a luminii. — Undele de lumină sînt longitudinale sau transversale ? — Eterul şi concepţia. mecanicistă.
§ 11. CELE DOUĂ FLUIDE ELECTRICE
Paginile următoare cuprind o expunere puţin captivantă) a unor experienţe foarte simple. Expunerea este plictisitoare nu numai datorită faptului că descrierea unei experienţe nu poate fi atît de interesantă ca efectuarea ei, ci şi prin aceea că semnificaţia unei experienţe nu apare decît prin teorie. Scopul nostru este de a da un exemplu deosebit de elocvent, referitor la rolul teoriei în fizică.
1. Pe un picior de sticlă este montată o bară metalică ale cărei capete sînt legate prin sîrme cu cîte un? electroscop (fig. 24). Ce este un electroscop ? Este un aparat simplu care constă, în esenţă, din două foiţe de aur atîrnate de capătul de jos al unei tije metalice. Totul este introdus într-un vas de sticlă în aşa fel încît me-

talul să nu vină în atingere decît cu corpuri nemetalice, numite izolatori. In afară de electroscop şi de bara metalică, mai avem nevoie de un baston de ebonită şi de o bucată de flanelă.
Experinţa se face după cum urmează : în primul rînd ne asigurăm că foiţele metalice atirnă lipite una de alta, căci aceasta este poziţia lor normală. Dacă din întîmplare ele sînt depărtate, ie aducem la normal, atingînd cu degetul bara metalică. O dată terminate aceste pregătiri, frecăm bastonul de ebonită cu bucata de flanelă şi apoi îl punem în atingere cu metalul. Imediat foiţele metalice se depărtează. Ele rămîn despărţite şi după ce bara de ebonită a fost îndepărtată.
2. Să facem o altă experienţă în care folosim acelaşi aparat ca mai înainte, foiţele fiind din nou lipite. De data aceasta însă nu atingem bara metalică cu bastonul de ebonită, ci îl apropiem numai de ea. Foiţele metalice se depărtează din nou, însă cu o diferenţă. Cum se îndepărtează bastonul de ebonită (fără a fi atins bara) ele revin imediat în poziţia iniţală, în loc să rămînă separate.
3. Să modificăm puţin aparatul nostru pentru o a treia experienţă. Să presupunem că bara metalică constă din două părţi împreunate. Frecăm din nou bara de ebo-
tatăm că foiţele rămîn îndepărtate în loc să revină la poziţia lor normală, ca în experienţa a doua.
Este greu de presupus că s-ar putea pasiona cineva pentru aceste experienţe simple şi naive. în evul mediu probabil că experimentatorul ar fi fost condamnat ; nouă însă ele ne par nu numai anoste ci şi nelogice. Ar fi foarte greu, ca o dată citită descoperirea lor, să le repetăm fără a ne tulbura. O anumită noţiune teoretică le face inteligibile. Am putea spune mai mult : este aproape de necon
nită cu bucata de flanelă şi o apropiem de metal.
Fig. 25
Foiţele metalice diverg ca mai înainte. Dar dacă separăm bara în cele două părţi şi numai după aceea îndepărtăm bastonul de ebonită (fig. 25), cons-

ceput ca astfel de experienţe să fi fost efectuate ca un joc întîmplător, fără o idee prealabilă mai mult sau mai puţin precizată asupra semnificaţiei lor.
Vom indica acum ideile de bază ale unei teorii foarte simple şi naive, care explică toate fenomenele descrise.

Există două fluide electrice, unul numit pozitiv (+), iar altul negativ (—). Ele au întrucîtva un caracter de substanţă, în sensul explicat mai sus, adică putem mări sau micşora cantitatea lor, dar în orice sistem izolat se conservă suma totală. Există totuşi o deosebire esenţială între cazul acesta şi cel al căldurii, al materiei sau al energiei. Aven? două substanţe electrice. în cazul acesta nu putem folosi analogia noastră de mai înainte, cu banii, fără a o generaliza întrucîtva. Un corp este neutru din punct de vedere electric, dacă fluidul electric pozitiv şi cel negativ se a-nulează reciproc. O persoană nu are nici un ban, fie dacă efectiv nu posedă nimic, fie dacă suma pe care a pus-o de o parte în casa de bani este exact egală cu suma pe care o datorează. Am putea compara cele două fluide electrice cu sumele înscrise în rubricile debit şi credit ale registrului.
Ipoteza următoare a teoriei este că două fluide electrice de acelaşi fel se resping, în vreme ce două fluide opuse se atrag. Aceasta se poate
reprezenta grafic în modul a- • $
ratat în fig. 26. + +.
Trebuie să adoptăm în teoria noastră încă un postulat.
Există două feluri de corpuri, • ©->-
şi anume, corpuri în care fluidele se pot mişca liber, numite conductori, şi altele, în care ele
nu se pot mişca liber, numite ® ^_0
izolatori. Ca întotdeauna, în + -
astfel de cazuri, nu trebuie să Fig. 26
luăm ad litteram această clasificare. Conductorul ideal sau izolatorul ideal este o ficţiune care nu poate fi niciodată realizată. Metalele, pă-mîntul, corpul omenesc sînt exemple de conductori, deşi nu la fel de buni. Sticla, cauciucul, porţelanul şi altele

asemănătoare sînt izolatori. Aerul este un izolator parţial cum ştie oricine care a asistat la experienţele descrise mai sus. Umiditatea aerului, care măreşte conductiblitatea sa, constituie, oricînd, o scuza bună pentru nereuşita unor experienţe de electrostatică.
Ipotezele teoretice menţionate sînt suficiente pentru explicarea celor trei experienţe descrise. Să le discutam din nou în ordinea în care au fost prezentate, dar de data aceasta în lumina teoriei fluidelor electrice.
1. Bara de ebonită, întocmai ca alte corpuri, este electric neutră, în condiţii normale. Ea conţine, în cantităţi, egale, cele două fluide, pozitiv şi negativ. Cînd o frecam cu flanela, separăm cele două fluide. Această afirmaţie este pur convenţională căci ea nu constituie decît aplicarea terminologiei create de teorie la descrierea procesului de frecare. Felul de electricitate care rămîne în exces după aceea îl numim negativ ; denumirea aceasta este evident tot o chestiune de convenţie. Pentru a ne conforma convenţiei adoptate, excesul care ar fi rezultat prin frecarea unei vergele de sticlă cu o blană de pisică l-am fi numit pozitiv. Să continuăm experienţa şi să comunicăm conductorului metalic fluidul electric, atingîndu-1 cu bastonul de ebonită. El se mişcă liber, răspîndindu-se pe tot metalul, inclusiv foiţele de aur. întrucît acţiunea unei sarcini negative asupra altei sarcini negative este o repulsie, cele două foiţe vor tinde să se îndepărteze cît mai mult una de alta şi rezultatul este separarea observată. Metalul este montat pe un picior de sticlă sau alt izolator, astfel încît fluidul rămîne pe conductor atît timp cît îi permite conductibilitatea aerului. Acum înţelegem şi de ce este necesar să atingem metalul înainte de începerea experienţei. Făcînd aceasta, metalul, corpul şi pămîntul formează un singur conductor imens, pe care fluidul se răspîndeşte diluîndu-se atît de mult încît nu mai rămîne practic nimic pe electroscop.
2. Experienţa aceasta începe exact în acelaşi mod ca şi precedenta. Dar in loc să atingem metalul cu bastonul de ebonită, îl apropiem numai de el. Cele două fluide de pe conductor putîndu-se mişca liber se separă, unul fiind atras, celălalt respins.
Indepărtînd bara de ebonită, ele

se amestecă din nou, deoarece, după cum ştim, fluidele <te servele contrare se atrag.
3. Acum să separăm bara metalică în două părţi şi apoi să îndepărtăm bastonul de ebonită. în acest caz, cele două fluide nu se mai pot amesteca, astfel că foiţele de aur rămîn depărtate, fiecare pereche purtînd în exces unul din cele două fluide electrice.

In lumina acestei teorii simple, toate faptele prezentate pînă acum par lămurite. Aceeaşi teorie ne permite chiar să explicăm multe alte fapte din domeniul „electro-staticii". Scopul oricărei teorii este de a ne conduce la fapte noi, de a ne sugera noi experienţe şi de a ne conduce la descoperirea unor fenomene şi legi noi. Un exemplu ne va lămuri. Să presupunem că modificăm experinţa a doua în sensul că atingem conductorul cu degetul în timp ce apropiem bastonul de ebonită de el. Ce se va în-tîmplă ? Conform teoriei, fluidul respins (—) se poate scurge prin corpul nostru astfel că pe conductor va rămîne numai unul din fluide, în cazul de faţă cel pozitiv. Numai foiţele electroscopului mai apropiate de bastonul de ebonită vor rămîne desfăcute (fig. 27). Experienţa confirmă prezicerea noastră.
Teoria pe care am expus-o este naivă şi insuficientă din punctul de vedere al fizicii moderne. Totuşi, este un bun exemplu care arată trăsăturile caracteristice ale oricărei teorii fizice.
Fig. 27
27
Evoluţia fizici*
Nu există teorii eterne în ştiinţă. Se intîmplă uneori ca unele din faptele prezise de teorie să fie contrazise de experinţă. Fiecare teorie are perioada ei de dezvoltare treptată şi de triumf, după care poate suferi un declin rapid. Ascensiunea şi căderea teoriei căldurii-substanţă., expuse mai sus, constituie unul din multele exemple. Altele, mai profunde şi mai însemnate, le vom trata mai tîrziu. Aproape fiecare mare progres ştiinţific se naşte dintr-o criză a vechii teorii, printr-un efort pentru a găsi o ieşire din dificultăţile apărute. De aceea, trebuie să examinăm ideile şi teoriile vechi, deşi ele aparţin trecutului, deoarce aceasta este singura cale de a înţelege importanţa celor noi ş; de a cunoaşto limitele vaiabillt'iţii acestora.
în primele pagini ale acestei cărţi am comparat rolul cercetătorului cu cel al unui detectiv care, după ce a adunat faptele necesare, găseşte soluţia corectă prin simplă reflexiune. într-un punct esenţial, această comparaţie trebuie considerată foarte superficială. Atît în viaţă cît şi în romanul poliţist, crima este un fapt dat ; detectivul trebuie să caute scrisori, amprente digitale, gloanţe, arme» dar el ştie cel puţin că s-a comis un asasinat. Pentru omul de ştiinţă situaţia se prezintă altfel. Nu este greu să ne imaginăm o persoană care nu ştie nimic despre electricitate, la urma urmei anticii au trăit foarte fericiţi fără a o cunoaşte de loc. Dacă unui astfel de om i s-ar pune în mînă o bucată de metal, nişte foiţe de aur, un baston de sticlă, un baston de ebonită şi o bucată de flanelă, pe scurt întregul material necesar pentru efectuarea celor trei experienţe ale noastre, atunci chiar dacă ar fi o persoană foarte cultă, după toate probabilităţile, el va umple sticlele cu vin, cîrpa ar folosi-o pentru curăţat şi nu i-ar trece niciodată prin gind să facă faptele descrise mai sus. Pentru detectiv, crima este un fapt dat, şi se pune problema : cine 1-a omorît pe Cock Robin ? Omul de ştinţă însă trebuie, cel puţin în parte, să comită propria sa crimă şi totodată să întreprindă investigaţiile. Afară de a-ceasta, misiunea lui nu se rezumă la lămurirea unui singur caz, ea consistă în explicarea tuturor fenomenelor care au avut loc sau care s-ar mai putea produce.
Declinul concepţiei mecaniciste
27
In introducerea noţiunii de fluid recunoaştem in-fluienţa acelor idei, mecaniciste, care încearcă să explice toate fenomenele cu ajutorul substanţelor şi al unor forţe simple care acţionează între ele. Pentru a stabili dacă punctul de vedere mecanicist poate fi aplicat şi descrierii fenomenelor electrice, să examinăm următoarea problemă : Fie date două sfere mici, ambele încărcate electric, adică în care unul din cele două fluide electrice este în exces. Ştim că aceste sfere sau se atrag sau se resping. Dar trebuie ca forţa să depindă numai de distanţă, şi dacă, da, in ce fel? Presupunerea cea mai simplă pare a fi că această forţă depinde de distanţă ca cea gravitaţională care, de exemplu, se reduce la a noua parte din intensitatea ei iniţială cînd distanţa se triplează. Experienţele efectuate de Coulomb au confirmat valabilitatea acestei legi. O sută de ani după ce Newton descoperise legea gravitaţiei, Coulomb a stabilit pentru forţele electrice o dependenţă analogă de distanţă. Există, totuşi, două deosebiri, esenţiale, intre legea lui Newton şi cea a lui Coulomb : atracţia gravitaţională între două corpuri are loc întotdeauna, în vreme ce forţele electrice se exercită numai dacă cele două corpuri au sarcini electrice.

în cazul gravitaţiei avem numai atracţie, pe cînd forţele electrice pot fi ori de atracţie ori de respingere.
Se naşte acum aceeaşi întrebare care a fost examinată în legătură cu căldura : sînt sau nu sînt fluidele electrice substanţe fără greutate ? Cu alte cuvinte, greutatea unei bucăţi de metal este aceeaşi fie că metalul este neutru, fie că este încărcat ? Balanţele noastre nu indică nici o diferenţă. Conchidem că fluidele electrice fac de asemenea parte din familia substanţelor imponderabile.
Progresul următor în teoria electricităţii a necesitat introducerea a două noţiuni noi. Vom evita din nou definiţiile riguroase înlocuindu-le cu analogii între conceptele noi şi cele de acum familiare. Ne amintim cit de esenţială, pentru înţelegerea fenomenelor calorice, fusese distincţia dintre căldură şi temperatură.
Este important, de asemenea, să facem o deosebire între potenţialul electric şi sarcina electrică. Deosebirea

dintre cele două concepte reiese foarte limpede din următoarea analogie :
potenţial electric — temperatură sarcină electrică — căldură Doi conductori, de exemplu două sfere, de mărimi -diferite, care conţin aceeaşi sarcină electrică, adică acelaşi exces al unuia din cele două fluide electrice, vor avea totuşi potenţiale diferite şi anume : sfera mai mică va .avea potenţialul mai înalt şi sfera mai mare potenţialul mai mic. în adevăr, fluidul electric va avea o densitate artai mare, va fi mai înghesuit, pe conductorul mai mic. Cum forţele de respingere cresc cu densitatea, tendinţa sarcinilor de a se desprinde de conductor este mai mare în cazul sferei mici decît în cazul sferei mari. Tendinţa aceasta a sarcinilor, de a părăsi conductorul, este o măsură directă a potenţialului lor.
Pentru a arăta clar diferenţa dintre sarcină şi potenţial, vom formula unele caracteristici care descriu comportarea corpurilor încălzite şi caracteristicile corespunzătoare ale comportării conductorilor încărcaţi.
CAL DL' RA
Două corpuri, iniţial la temperaturi diferite, ajung după un timp la aceeaşi temperatură, dacă sînt aduse în contact.
Cantităţi egale de căldură produc variaţii de temperatură diferite în corpuri, dacă acestea au călduri specifice diferite.
Un termometru în atingere cu un corp indică, prin lungimea coloanei sale de mercur, temperatura sa proprie şi deci şi temperatura corpului.
ELECTRICITATE
Doi conductori izolaţi, iniţial la potenţiale electrice diferite, ajung foarte repede la acelaşi potenţial, dacă sînt puşi în contact.
Cantităţi egale ale unei sarcini electrice produc variaţii diferite ale potenţialului electric a două corpuri, dacă acestea au capacităţi electrice diferite.
Un electroscop în contact cu un conductor indică, prin îndepărtarea foiţelor de aur, propriul său potenţial electric şi, prin urmare, cel al conductorului.
Dar această analogie nu trebuie împinsă prea departe. Un exemplu ne va arăta atît deosebirile, cît şi asemănările. Dacă un corp cald este pus în contact cu unul rece, căldura curge de la corpul mai cald la cel mai rece. Să

considerăm acum doi conductori izolaţi avînd sarcini egale dar de nume contrare, unul sarcină pozitivă, celălalt sarcină negativă ; potenţialele lor vor fi diferite. Prin convenţie, considerăm potenţialul corespunzător sarcinii negative mai scăzut decît pe cel al sarcinii pozitive. Dacă conductorii sînt puşi în contact, sau legaţi printr-o sîrmă, potrivit teoriei fluidelor electrice, ei nu vor mai avea nici o sarcină şi deci nici o diferenţă de potenţial electric. Trebuie să ne imaginăm că în scurtul interval de timp în care s-a anulat diferenţa de potenţial, sarcina electrică „a curs" de la un conductor la celălalt. Dar cum ? A curs fluidul pozitiv către corpul negativ sau fluidul negativ către corpul pozitiv ?
Materialul prezentat pînă acum nu oferă nici o bază pentru a decide între aceste două posibilităţi. Putem s-o admitem fie pe una, fie pe cealaltă, fie că scurgerea are loc simultan în ambele sensuri. Totul este o chestiune de convenţie şi nu trebuie să ataşăm nici o semnificaţie alegerii noastre, dat fiind că nu cunoaştem nici o metodă de a decide prin experienţă. Dezvoltarea ulterioară care a condus la o teorie mult mai profundă a

electricităţii, a dat un răspuns acestei întrebări, dar care este aproape fără sens dacă este formulat cu terminologia teoriei simple şi primitive a fluidelor electrice. Vom adopta următorul mod de exprimare. Fluidul electric curge de la conductorul cu potenţialul mai ridicat la cel cu potenţialul mai scăzut. în cazul celor doi conductori consideraţi, electricitatea curge deci de la cel încărcat pozitiv la cel încărcat negativ (fig. 28). Această exprimare este pur convenţională şi ca atare cu totul arbitrară. Din această dificultate reiese că analogia dintre căldură şi electricitate nu este cîtuşi de puţin completă.
Am văzut că se poate adopta concepţia mecanicistă la descrierea faptelor elementare ale electrostaticii. Acest lucru este posibil şi în cazul fenomenelor magnetice.
5 — Evoluţia fizicii
29
Evoluţia fizicii
§ 12. FLUIDELE MAGNETICE
Vom proceda în cazul acesta la fel ca mai înainte» începind cu fapte foarte simple şi căutînd apoi să le explicăm teoretic.
1. Avem două bare magnetice lungi : una suspendată liber în centrul ei, pe cealaltă o ţinem în mînă (fig. 29). Apropiem capetele lor pînă constatăm că ele se atrag puternic. Aceasta se poate realiza întotdeauna ; dacă nu se constată atracţie întoarcem magnetul şi încercăm cu capătul celălalt. Trebuie să se petreacă ceva, dacă barele sînt magnetice. Capetele magneţilor le numim poli. In continuarea experienţei, plimbăm polul magnetului ţinut în mînă, în lungul celuilalt magnet. Constatăm că atracţia descreşte, iar cînd polul trece prin dreptul centrului magnetului suspendat nu se mai manifestă nici o forţă. De-plasind polul mai departe în aceeaşi direcţie, constatăm o respingere, care atinge maximum de intensitate la polul celălalt al magnetului suspendat.
2. Experienţa de mai sus sugerează o alta. Fiecare magnet are doi poli ; am putea oare izola unul din ei? Soluţia este simplă : rupem un magnet în două părţi egale. Am văzut doar că nu se exercită nici o forţă între polul unui magnet şi mijlocul altui magnet. Dar, dacă rupem în adevăr un magnet în două părţi egale, constatăm un lucru surprinzător şi neprevăzut. Repetînd experienţa descrisă la punctul 1 cu oricare din aceste jumătăţi de magnet, de asemenea suspendată liber, fenomenele sînt aceleaşi ca mai înainte. Acolo unde mai înainte nu se ma
Fig. 29
Declinul concepţiei mecaniciste
29
nifesta nici o urmă de forţă magnetică, a apărut acum un pol puternic.
Cum trebuie explicate aceste fapte? Am putea încerca să construim o teorie a magnetismului pe calapodul teoriei fluidelor electrice. Ideea ne este sugerată de faptul că şi în magnetism avem atracţie şi respingere întocmai ca în cazul fenomenelor electrostatice. Să considerăm doi conductori sferici, încărcaţi cu sarcini e-gale, unul cu sarcini pozitive, celalalt cu sarcini negative.
în cazul de faţă, Flg* ao
„egale" înseamnă că au aceeaşi valoare absolută dar semne contrare, ca de exemplu + 5 şi — 5. Să presupunem că aceste sfere sînt unite între ele printr-un izolator, de exemplu printr-o bară de sticlă. Schematic ansamblul a-cesta poate fi reprezentat printr-o săgeată îndreptată de la cJonductorul negativ către cel pozitiv (fig. 30). Vom numi întregul sistem un dipol electric. Este clar că doi asemenea dipoli se vor comporta exact la fel ca barele magnetice în experienţa 1. Dacă adoptăm drept model al unui magnet real sistemul inventat de noi, putem spune, admiţînd existenţa unui fluid magnetic, că un magnet nu este altceva decît un dipol magnetic, care la capete conţine două fluide diferite. Această teorie simplă, care imită teoria electricităţii, este suficientă pentru a explica prima experienţă. Ea ne dă atracţie la un capăt, respingere la celălalt şi la mijloc compensarea forţelor egale şi opuse. Cum rămîne însă cu experienţa a doua? Cînd rupem bara de sticlă care formează dipolul electric, rezultă doi poli izolaţi. Acelaşi lucru ar trebui să se întîmple şi cu bara de fier care formează dipolul magnetic, dar faptul acesta este contrazis de rezultatul experienţei a doua, Contradicţia aceasta ne sileşte să introducem o teorie ceva mai subtilă. în locul modelului precedent, admitem că magnetul constă din nişte dipoli magnetici elementari foarte mici, care nu mai pot fi rupţi în poli separaţi. In magnetul luat ca un tot stăpîneşte ordinea, toţi dipolii fiind orientaţi la fel (fig. 31). Rezultă imediat de ce, tăind

magnetul, apar noi poli la noile capete, precum şi de ce această teorie perfecţionată explică atît experienţa 1 cît şi experienţa 2.
Pentru multe fapte, teoria simplă dă o explicaţie, iar o perfecţionare nu pare necesară. Să luăm un exemplu .
ştim că un magnet a-| atrage bucăţi de fier. ~~ ~ De ce ? Intn-o bucată ^e fjer obişnuit cele "<— două fluide magnetice * sînt amestecat^, astfel
Fig 31 că nu se constată nici un efect exterior. Apropiind un pol pozitiv, el acţionează asupra fluidelor ca o „comandă de separare" adresată fluidelor. El atrage fluidul negativ şi-1 respinge pe cel pozitiv. Rezultă atracţia dintre fier şi magnet. Dacă îndepărtăm magnetul, fluidele îşi reiau starea iniţială în măsură mai mare sau mai mică, în funcţie de tăria cu care le mai răsună în „urechi" vocea de comandă a forţelor exterioare.
Rămîne puţin de spus asupra părţii cantitative a problemei. Cu două bare magnetizate, foarte lungi, putem să examinăm atracţia (sau respingerea) polilor lor, dacă le apropiem. Efectul celorlalte extremităţi ale barelor este neglijabil, dacă barele sînt destul de lungi. Cum depinde atracţia, respectiv respingerea, de distanţa dintre cei doi poli? Răspunsul dat de experienţa lui Coulomb este că această dependentă de distanţă este aceeaşi ca în legea gravitaţiei a lui Newton şi în legea electrostatică a lui Coulomb.
Regăsim din nou, în această teorie, aplicarea unui punct de vedere general : tendinţa de a descrie toate fenomenele cu ajutorul unor forţe de atracţie sau de respingere, cari depind numai de distanţă şi acţionează între particule invariabile.
Vom aminti un fapt bine cunoscut, pe care-1 vom folosi mai tîrziu. Pămîntul este un mare dipol magnetic. Nu există nici urmă de explicaţie a acestui fapt. Polul nord coincide aproximativ cu polul negativ (—) magnetic al Pămîntului şi polul sud cu polul pozitiv (+).
Denumirile po

zitiv şi negativ sînt numai o chestie de convenţie, dar odată fixate, ele ne pun în măsură să indicăm polii în oricare alt caz. Un ac magnetic care se poate roti în jurul unui ax vertical se supune comenzii forţei magnetice a Pămîntului. El se îndreaptă cu polul (+) către polul nord, adică spre polul (—) magnetic al Pămîntului.
Chiar dacă putem aplica în mod consecvent concepţia mecanicistă a fenomenelor electrice şi mecanice tratate pînă acum, nu avem nici un motiv să fim prea mîndri sau încîntaţi de aceasta. Unele aspecte ale teoriei sînt nesatisfăcătoare, dacă nu chiar descurajatoare. Au trebuit să fie inventate noi feluri de substanţe : cele două fluide electrice şi dipolii magnetici elementari. Abundenţa substanţelor începe să ne copleşească.
Forţele sînt simple. Forţele gravitaţionale, electrice, magnetice, pot fi exprimate în acelaşi mod.
Dar această simplicitate este scump plătită : cu introducerea unor noi substanţe fără greutate. Acestea sînt noţiuni cam artificiale şi fără nici o legătură cu substanţa fundamentală, masa.
§ 13. PRIMA DIFICULTATE SERIOASĂ
Sîntem acum gata să semnalăm prima mare dificultate întîmpinată de aplicarea punctului nostru de vedere filosofic general. Vom arăta mai tîrziu că această dificultate, împreună cu o alta şi mai serioasă, a provocat spulberarea credinţei că toate fenomenele pot fi explicate din punctul de vedere mecanicist.
Dezvoltarea uriaşă a electricităţii, ca ramură a ştiinţei şi tehnicii, a început o dată cu descoperirea curentului electric. Aici găsim în istoria ştiinţei unul din foarte puţinele exemple în care întîmplarea pare să fi jucat un rol esenţial. Povestea contracţiilor piciorului de broască este prezentată în multe versiuni diferite. Fără a ne preocupa de adevărul cu privire la amănunte, un lucru este sigur, anume că descoperirea întîmplătoare a lui Galvani. 1-a condus pe Volta, către sfîrşitul secolului al XVIII-lea, la construirea aşa-numitei baterii volt aice. Ea nu se mai foloseşte în practică, dar continuă încă să constituie un

exemplu foarte simplu de sursă de curent în demonstraţiile de curs şi în descrierile din manuale.
Principiul ei de construcţie este simplu. Ea constă din mai multe vase de sticlă umplute cu apă în care s-a turnat puţin acid sulfuric. în fiecare vas sînt cufundate, în soluţie, două plăci metalice, una de cupru şi alta de zinc. Placa de cupru a unui vas este legată cu placa de zinc a următorului, astfel că numai placa de zinc a primului şi placa de cupru a ultimului vas rămîn libere. Putem decela o diferenţă de potenţial electric între placa de zinc din primul vas şi placa de cupru din ultimul vas cu ajutorul unui electroscop destul de sensibil, dacă numărul „elementelor" adică al vaselor prevăzute cu plăci, cari alcătuiesc bateria, este destul de mare.
Numai în scopul de a obţine un efect uşor măsurabil cu aparatul descris, am introdus o baterie compusă din mai multe elemente. De aici înainte un singur element ne va sluji tot atît de bine. Se constată că potenţialul Cuprului este mai înalt decît cel al zincului şi anume în sensul în care + 2 este mai mare decît — 2. Dacă se ieagă un conductor de placa de cupru liberă şi un al doilea de cea de zinc, atuncfi ambii se vor încărca electric, primul pozitiv, al doilea negativ. Pînă acum n-a intervenit nimic prea nou sau surprinzător, astfel că putem încerca să folosim ideile noastre anterioare asupra diferenţelor de potenţial. Am văzut că diferenţa de potenţial dintre 'doi conductori poate fi anulată repede prin legarea lor cu o sîrmă, producîndu-se un flux de fluid electric de la un conductor la celălalt. Adest proces este asemănător cu egalizarea temperaturilor prin fluxul de căldură. Se constată acelaşi lucru şi în cazul bateriei voltaice? în memoriul său, Volta a scris că plăcile se comportă ca nişte conductori :
„...slab încărcaţi, cari acţionează fără întrerupere sau astfel ca sarcina lor să se regenereze singură, după fiecare descărcare ; într-un cuvînt, produc o sarcină nelimitată sau exercită o acţiune sau un impuls continuu asupra fluidului electric.
Rezultatul uluitor al acestei experienţe este că diferenţa de potenţial dintre cupru şi zinc nu dispare ca în cazul a doi conductori încărcaţi, uniţi printr-o sîrmă. Di
Declinul concepţiei mecaniciste
31
ferenţa persistă şi, potrivit teoriei fluidelor, ea trebuie să determine o curgere constantă de fluid electric de la nivelul mai înalt (placa de cupru) la cel mai jos (placa de zinc). Am putea încerca să salvăm teoria fluidelor, pre-supunînd că o forţă constantă acţionează astfel încît să restabilească diferenţa de potenţial, producînd o curgere a fluidului electric. Dar întregul fenomen este uimitor din punct de vedere al energiei. O cantitate apreciabilă de căldură se dezvoltă în sîrma străbătută de curent-, suficientă chiar să topească sîrma, dacă aceasta este subţire. Deci în sîrmă se dezvoltă energie calorică. Dar întreaga baterie voltaică formează un sistem izolat deoarece nu primeşte energie din exterior. Dacă vrem să salvăm legea conservării energiei, trebuie să stabilim unde au loc transformările şi în dauna cui apare căldura. Nu este greu să ne dăm seama că în baterie au loc procese chimice complicate, în care joacă un rol activ cuprul şi zincul împlîn-taţi în soluţie, precum şi lichidul însuşi. Din punctul de vedere energetic, lanţul de transformări care au loc este următorul: energia chimicăenergia fluidului electric în curgere (adică energia curentului electric) -> căldura. O baterie voltaică nu ţine la infinit ; transformările chimice asociate cu fluxul de electricitate faci bateria neutilizabilă după un timp.
Experienţa care cu adevărat a scos la lumină «ms&îie dificultăţi în np1iparpa fflnrepţiei mecaniciste va părea stranie celui care o aude pentru prima oară. Ea a fost efectuată acum vreo 120 de ani de către Oersted. El scrie:
„Prin aceste experienţe pare dovedit că acul magnetic a fost deplasat din poziţia sa normală cu ajutorul unui element galvanic şi anume cînd circuitul galvanic era închis, nu deschis cum au încercat zadarnic să arate anumiţi fizicieni foarte renumiţi acum cîţiva ani".
Să presupunem că avem o baterie voltaică şi un fir conductor. Dacă sîrma este legată de placa de cupru fără a fi legată şi la cea de zinc, va exista o diferenţă de potenţial, dar curentul nu va putea să circule. Să'presupunem că am îndoit firul astfel încît să formeze un cerc, în al cărui centru este situat un ac magnetic, cercul şi •acul magnetic fiind în acelaşi plan. Atît timp cît firul nu
31
Evoluţia fizicii

atinge placa de zinc, nu se întîmplă nimic, nu acţionează nici o forţă, diferenţa de potenţial neavînd nici o influenţă asupra poziţiei acului. Este greu de înţeles de ce fizicienii „foarte vestiţi", cum îi numeşte Oersted, se aşteptau la o asemenea influenţă. Să unim însă acum sîrma şi placa de zinc. Numai decît se va produce un lucru ciudat : acul magnetic se va roti în poziţia sa. Unul din polii lui va fi îndreptat spre cititor, dacă foaia acestei cărţi reprezintă planul cercului. Efectul acesta se datoreşte unei forţe care acţio-
rite : magnetismul şi curentul electric. Dar ea are un alt aspect chiar mai important. Forţa care se exercită între polul magnetic şi fiecare din micile porţiuni de sîrma de-a lungul căreia curge curentul nu poate fi orientată în lungul liniei care uneşte sîrma cu acul, sau care uneşte particulele fluidului electric cu dipolii magnetici elementari. Forţa este perpendiculară pe aceste linii. Pentru prima dată îşi face apariţia o forţă cu totul diferita de cele la care, potrivit punctului nostru de vedere mecanicist, încercasem să reducem toate acţiunile din lumea exterioară. Ne amintim că forţele gravitaţionale, electrostatice şi magnetice, conform legilor lui Newton şi Cou-lomb, acţionează în lungul liniei care uneşte cele două corpuri, care se atrag sau se resping.
nează asupra polului magnetic şi este perpendiculară pe plan (fig 32). Faţă de aceste fapte experimentale cu greu am putea evita să tragem o. astfel de concluzie cu privire la direcţia forţei care acţionează.
Fig.32
Experienţa aceasta este interesantă, mai întîi deoarece a-rată o legătură între două fenomene care par cu totul dife-
Declinul concepţiei mecaniciste
Această dificultate a fost accentuată de o experienţă efectuată cu mare îndemînare de Rowland, în urmă cu aproape 60 de ani. Lăsînd la o parte amănuntele tehnice,, această experienţă poate fi descrisă după cum urmează. Fie o mică sferă încărcată. Să ne imaginăm că această, sferă se mişcă foarte repede pe un cerc în al cărui centru este un ac magnetic. In _____j
sted, cu diferenţa că spre deo- u \
sebire de curentul electric o- # \
bişnuit, mişcarea sarcinii elec- } ,. J
trice este produsă pe cale me- 1 J
canică. Rowland a stabilit că *v J
rezultatul este în adevăr ase- \ /
mănător cu cel observat la tre- \ y/
cerea unui curent printr-o sîrmă circulară (fig. 33). Magnetul este deviat de către o Fig 33 forţă perpendiculară.
Să mişcăm acum sarcina electrică din ce în ce mai; repede. Forţa care acţionează asupra polului magnetic creşte; devierea de la poziţia iniţială devine mai accentuată. Această observaţie prezintă o altă complicaţie foarte gravă. Nu numai că forţa nu acţionează în lungul liniei care uneşte sarcina cu magnetul, ci intensitatea forţei depinde de viteza sarcinii. întreaga concepţie mecanicistă se baza pe convingerea că toate fenomenele pot fi explicate prin jocul unor forţe care depind numai de distanţă şi nu de viteză. Rezultatul experienţei lui Rowland, ne sdruncină evident această credinţă. Putem insa încerca să fim conservatori, căutînd o soluţie. în cadrul vechilor idei.
Dificultăţi de acest fel, piedici subite şi neaşteptate în dezvoltarea triumfală a unei teorii, se ivesc frecvent în ştiinţă. Uneori o simplă generalizare a ideilor vechi pare să constituie, cel puţin temporar, o ieşire din impas. Astfel, în cazul de faţă, se pare că este de ajuns să lărgim punctul de vedere anterior şi să introducem forţe mai generale între particulele elementare. Foarte
principiu experienţa aceasta este identică cu acea a lui Oer-
\

des însă ne este imposibil să reparăm o teorie veche şi atunci dificultăţile provoacă prăbuşirea ei şi naşterea unei teorii noi. Aici, nu numai comportarea micului ac magnetic a ruinat teoriile mecaniciste, în aparenţă aşa de bine fundate şi încununate de succes. Un alt atac, şi mai puternic încă, a venit din cu totul altă parte. Dar aceasta este o altă poveste pe care o vom istorisi mai tîrziu.

§ 14. VITEZA LUMINII

în „Două ştiinţe noi" a lui Galileu, asistăm la discuţia dintre un profesor şi elevii săi, asupra vitezei luminii :

Sagredo: Dar de ce natură este viteza luminii şi cît de mare trebuie considerată ? Este ea instantanee, sau are nevoie de timp, la fel ca alte mişcări ? Nu putem decide aceasta printr-o experienţă ?

Simplicio : Experienţa de toate zilele ne arată că propagarea luminii este instantanee, deoarece cînd privim de la mare depărtare o salvă de artilerie, flacăra ajunge la ochiul nostru fără pierdere de timp, dar sunetul ajunge la ureche numai după un interval perceptibil.

Sagredo : Bine Simplicio, singurul lucru pe care-1 pot deduce din această experienţă obişnuită este că sunetul care ajunge la u-rechea noastră se deplasează mai încet decît lumina. Dar ea nu mă informează dacă sosirea luminii este instantanee sau dacă, deşi foarte rapidă, ea necesită totuşi un timp.

Salviati: Concluzia puţin sigură a acestor observaţii şi a altora asemănătoare m-a condus să imaginez o metodă cu ajutorul căreia s-ar putea stabili în mod exact dacă propagarea luminii este cu a-devărat instantanee..."

Salviati continuă să explice metoda experienţei sale. Pentru a putea înţelege ideea lui să ne închipuim că viteza luminii este nu numai finită ci şi mică, adică propagarea luminii este încetinită ca mişcarea unui film rulat cu încetinitorul. Doi oameni A şi B avînd lanterne acoperite stau la o distanţă, să zicem, de un kilometru unul de altul. Ei au convenit ca A să descopere primul lanterna, iar B să o descopere pe a sa, imediat ce vede lumină la A. Să presupunem că în „mişcarea noastră încetinită", lumina face un kilometru pe secundă. A trimite un semnal, descoperind lanterna sa, B îl vede după o secundă şi trimite un semnal de răspuns. A îl primeşte două secunde

după ce îl trimisese pe al său. Aşadar, dacă lumină călătoreşte cu o iuţeală de un kilometru pe secundă, se vor scurge două secunde între momentul cînd trimite şi momentul cînd primeşte A semnalul, presupunînd că B este la o depărtare de un kilometru. Invers, dacă A nu cunoaşte viteza luminii dar presupune că tovarăşul lui respectă înţelegerea şi dacă el observă dezvelirea lanternei lui B două secunde după ce a descoperit-o pe a sa, el poate deduce că viteza luminii este de un kilometru pe secundă. Cu tehnica experimentală de care se dispunea la vremea aceea Galileu avea puţine şanse de a determina viteza luminii pe calea aceasta. Dacă distanţa ar fi fost de un kilometru, el ar fi trebuit să poată măsura intervale de timp de ordinul a trei microsecunde(3-10*6 secunde).

Galileu a formulat problema determinării vitezei luminii, dar nu a rezolvat-o. Deseori formularea unei probleme este mai esenţială decît rezolvarea ei, care poate fi o chestiune de îndemînare matematică sau experimentală. A pune noi probleme, a descoperi noi posibilităţi, a privi probleme vechi dintr-un punct de vedere nou, implică imaginaţie creatoare şi marchează un progres real în ştiinţă. Principiul inerţiei şi legea conservării energiei au fost dobîndite numai prin gîndire nouă şi originală asupra unor experienţe şi fenomene bine cunoscute la vremea lor. Multe exemple de acest fel se vor întîlni în paginile care urmează, în care se va sublinia importanţa reconsiderării unor fapte cunoscute, într-o lumină nouă şi în care se vor descrie noi teorii.

Revenind la problema relativ simplă a determinării vitezei luminii, observăm că este surprinzător că Galileu nu şi-a dat seama că această experienţă ar putea fi efectuată mai simplu şi mai precis de către o singură persoană. în locul ajutorului său, el ar fi putut aşeza la depărtarea dorită o oglindă, care ar fi trimis semnalul înapoi, în mod automat, de îndată ce l-ar fi primit.

Tocmai de acest principiu s-a folosit vreo 250 de ani mai tîrziu Fizeau, primul care a determinat viteza luminii cu ajutorul unei experienţe terestre ; Romer o determinase mult mai înainte, dar mai puţin exact, pe bază de observaţii astronomice.

Est£ limpede că, dată fiind valoarea ei enormă, viteza luminii ar fi putut fi determinată fie luînd distanţe comparabile cu aceea dintre Pămînt şi o altă planetă a sistemului solar, fie graţie unei mari perfecţionări a tehnicii experimentale. Prima metodă a fost utilizată de

Ro-mer, cea de a doua de Fizeau. începînd de la aceste prime experienţe, extrem de importantul număr reprezentînd viteza luminii a fost determinat de multe ori cu o exactitate din ce în ce mai mare. în secolul nostru, o tehn^ă foarte rafinată a fost imaginată în acest scop de Micheî-son. Rezultatul acestor experienţe poate fi exprimat simplu : viteza luminii în vid este de aproximativ 186 000 mile pe secundă, sau 300 000 kilometri pe secundă.

§ 15. LUMINA CA SUBSTANŢĂ

Vom începe din nou cu cîteva fapte experimentale.. Numărul indicat mai sus se referă la viteza luminii în tid.. Lumina se propagă neperturbată cu această viteză, în vid. Putem vedea aceasta printr-un vas de sticlă dacă am scos aerul din el. Vedem planetele, stelele şi nebuloasele,, deşi pentru a ajunge de la ele pînă la ochiul nostru, lumina trebuie să treacă prin vid. Simplul fapt că putem vedea printr- un vas, indiferent dacă el conţine aer sau nu, dovedeşte că prezenţa aerului contează foarte puţin. De aceea, putem efectua experienţe optice într-o cameră obişnuită cu acelaşi efect ca şi cum nu ar fi aer în ea. Unul din cele mai simple fapte optice este că lumina se propagă în linie dreaptă. Vom descrie o experienţă simplă şi naivă care arată aceasta. în faţa unei surse punctiforme aşezăm un ecran avînd un orificiu. O sursă punctiformă este o sursă de lumină foarte mică, de exem-nlu, o deschidere foarte fină la o lanternă cu diafragmă. Pe un perete îndepărtat fanta ecranului se va prezenta ca o pată de lumină pe un fond întunecat. Figura 34 arată cum este legat acest fenomen de propagarea rectilinie a luminii. Toate fenomenele similare, chiar cele mai complicate, în care apar lumină, umbră şi penumbră, pot fi explicate cu ajutorul presupunerii că lumina se propagă in linie dreaptă în vid şi în aer.

Declinul concepţiei mecaniciste

Să luăm alt exemplu în care lumina trece prin materie. O rază de lumină trece prin vid şi cade pe o placă cu sticlă. Ce se va întîmplă? Dacă legea mişcării in linie dreaptă ar fi valabilă şi în cazul acesta, drumul razei ar trebui să fie cel indicat de linia punctată 01. în realitate însă nu se întîmplă aşa (fig. 35). Raza se frînge, cum arată figura. Fenomenul acesta este cunoscut sub numele de refracţie. Fenomenul obişnuit al băţului care pare frînt
la mijloc cînd este pe jumătate cufundat în apă este una din multele manifestări ale refracţiei. Aceste fapte sînt suficiente pentru a indica cum s-a putut imagina o teorie mecanicistă simplă a luminii. Ţinta noastră este ?ă arătăm cum au pătruns în domeniul opticii conceptele de substanţă, particulă şi forţă şi cum s-a prăbuşit, în cele din urmă, vechiul punct de vedere filosofic.

în cazul de faţă teoria se sugerează singură în forma ei cea mai simplă şi mai primitivă. Ea presupune că toate corpurile luminoase emit particule de lumină sau corpus-cule care, căzînd pe ochiul nostru, provoacă senzaţia de lumină. Sîntem atît de deprinşi să introducem substanţe noi, dacă este necesar, pentru o explicaţie mecanicistă, încît putem face acest lucru şi de data aceasta fără multă ezitare. Aceste corpuscule trebuie să se mişte în vid după linii drepte, cu o viteză cunoscută, aducînd ochiului nostru un mesagiu de la corpurile care emit lumină. Toate

Fig. 34

Fig. 35

Evoluţia fizicii

O O

fenomenele care pun în evidenţă propagarea rectilinie a luminii admit teoria corpusculară, căci acesta este tipul de mişcare ce fusese prescris pentru corpuscule. Teoria explică, de asemenea, foarte simplu reflexia luminii pe oglinzi, asimilînd-o cu reflexia unor mingi (elastice) aruncate de perete, ca în experienţa mecanică schiţată în fig. 36.

Explicaţia refracţiei este puţin mai grea. Fără a intra în amănunte, putem întrevedea îr> ce sens ar fi posibilă o explicaţie mecanicistă. Ar fi de a-j uns să admitem că, atunci cînd corpusculele cad, de exemplu pe o suprafaţă de sticlă, particulele de materie acţionează a-supra lor ca o forţă care s-ar exercita destul de straniu numai în imediata vecinătate a materiei. Orice forţă care acţio-particule în mişcare, îi schimbă vi-

Fig 36

neaza asupra unei teza, după cum ştim. Dacă forţa rezultantă asupra corpus-culului de lumină ar fi o atracţie perpendiculară pe suprafaţa sticlei, atunci noua lui direcţie de mişcare va fi situată undeva între prelungirea drumului iniţial şi perpendiculară. Această explicaţie simplă pare să făgăduiască succes teoriei corpusculare a luminii. Pentru a stabili utilitatea şi domeniul de valabilitate al teoriei, trebuie totuşi să cercetăm fapte noi şi mai complicate.

§ 16. ENIGMA CULORII

Tot geniul lui Newton a explicat pentru prima oara lumea culorilor în Univers. Iată una din experienţele lui Newton, descrisă cu propriile lui cuvinte :

„în anul 1666 (pe cînd mă ocupam cu şlefuirea sticlelor optice, de alte forme decît cea sferică) mi-am procurat o prismă triunghiulară de sticlă, pentru a încerca să produc cu ea vestitul fenomen al culorilor. în scopul acesta, după ce am făcut întuneric în cameră şi am făcut o mică gaură în stor, ca să pot lăsa să intre a cantitate convenabilă de lumină a Soarelui, am aşezat prisma la

intrarea luminii, astfel, ca ea să apară refractată pe peretele opus. A fost pentru mine, la început, o distracţie plăcută să privesc culorile vii şi intense astfel produse".

Lumina Soarelui este „albă". După ce a trecut printr-o prismă, ea arată toate culorile care există în lumea vizibilă. Natura însăşi reproduce acest rezultat în frumoasa gamă de culori a curcubeului. încercările de a explica acest fenomen sînt foarte vechi. Povestea biblică potrivit căreia curcubeul ar fi semnul unui legămînt încheiat de Dumnezeu cu oamenii este, într-un sens, o „teorie". Ea nu explică însă satisfăcător de ce curcubeul reapare din timp în timp şi de ce întotdeauna în legătură cu ploaia. întreaga enigmă a culorii a fost atacată ştiinţific pentru prima oară şi soluţia ei schiţată în marea operă a lui Newton.

O margine a curcubeului este întotdeauna roşie, iar cealaltă violetă. între ele sînt aşezate toate celelalte culori. Newton explică acest fenomen astfel : fiecare culoare este prezentă în lumina albă. Ele toate străbat împreunate spaţiul interplanetar şi atmosfera, dînd, laolaltă, impresia de lumină albă. Lumina albă este, ca să zicem aşa, un amestec de corpuscule de diferite specii apartinînd diferitelor culori. în cazul experienţei lui Newton, prisma le separă în spaţiu. Potrivit teoriei mecaniciste, refracţia este datorită unor forţe care acţionează asupra particulelor de lumină, forţe izvorîte din particulele sticlei. Aceste forţe au intensităţi diferite pentru corpusculele corespunzînd la culori diferite, intensitatea lor fiind cea mai mare pentru violet şi cea mai mică pentru roşu. Ca atare, fiecare culoare va fi refractată pe alt drum reali-zîndu-se astfel separarea ei de celelalte cînd lumina a părăsit prisma. în cazul curcubeului, rolul prismei îl joacă picăturile de apă.

Teoria după care lumina este o substanţă e acum mai complicată decît înainte. în locul unei singure substanţe luminoase avem multe, fiecare corespunzînd altei culori. Insă dacă teoria cuprinde o parte de adevăr, atunci consecinţele ei trebuie să concorde cu observaţiile.

Succesiunea culorilor în lumina albă, aşa cum a fost ea pusă în evidenţă de experienţa lui Newton, se numeşte

spectrul Soarelui sau, mai precis, spectrul vizibil al Soarelui. Descompunerea luminii albe în componentele ei, cum s-a arătat mai sus, se numeşte dispersia luminii. Culorile separate ale spectrului ar trebui să poată fi reunite din nou de o a doua prismă aşezată în mod convenabil ; in caz contrar explicaţia dată este necorectă.

Procesul trebuie să fie exact inversul precedentului. Trebuie să obţinem lumina albă din culorile separate mai înainte. Newton a arătat prin experienţe că, în adevăr, este posibil să obţinem în modul acesta simplu lumina albă din spectrul ei şi spectrul din lumina albă, ori de cîte ori dorim. Aceste experienţe au constituit un sprijin puternic pentru teoria potrivit căreia corpusculele corespunzătoare ^fiecărei culori se comportă ca substanţe invariabile. Newton scria :

„...aceste culori nu sînt generate din nou, ci numai scoase în evidenţă prin despărţirea lor ; căci dacă sînt, din nou, complet a-mestecate şi contopite, ele recompun culoarea pe care o alcătuiau înaintea despărţirii. Şi, pentru acelaşi motiv, transmutările produse prin reunirea diverselor culori nu sînt reale, căci dacă diferitele raze sînt descompuse din nou,

apar exact aceleaşi culori, ca înainte de compunere, după cum o pulbere albastră şi una galbenă, a-mestecate intim, dau impresia de verde cînd sînt privite cu ochiul liber, deşi culorile corpusculelor care le compun nu sînt transmutate cu adevărat, ci numai amestecate. Căci, privite printr-un microscop bun, ele apar ca şi înainte într-un albastru împestriţat cu :galben".
Să presupunem că am izolat o fîşie foarte îngustă a spectrului. Aceasta înseamnă că din multele culori am lăsat să treacă printr-o fantă numai una, celelalte fiind «oprite de un ecran. Fasciculul care trece este constituit din lumină omogenă, adică lumină care nu mai poate fi separată în componente. Aceasta este o consecinţă a teoriei şi poate fi lesne confirmată experimental. Un astfel 'de fascicul de o singură culoare nu poate fi descompus mai departe prin nici un mijloc. Există procedee foarte simple de obţinere a izvoarelor de lumină omogenă. De exemplu, sodiul incandescent emite lumină omogenă galbenă. Deseori este foarte convenabil să efectuăm anumite experienţe optice cu lumină omogenă, întrucît, cum este uşor de înţeles, rezultatul va fi mult mai simplu.
Declinul concepţiei mecaniciste
36
Să ne închipuim că dintr-o dată s-ar întîmplă un lucru foarte ciudat : Soarele nostru ar începe să emită numai lumină omogenă de o anumită culoare, să zicem galbenă. Numai decît marea varietate a culorilor de pe Pă-mînt ar dispare. Toate obiectele ar fi ori galbene, ori negre. Această prezicere este o consecinţă a teoriei luminii ca substanţă, potrivit căreia nu pot fi create culori noi. Exactitatea acestei preziceri este confirmată de experienţă : într-o încăpere în care singurul, izvor de lumină este so-diul incandescent, orice obiect este fie galben, fie negru. Bogăţia de culori din lume oglindeşte varietatea de culori din care se compune lumina albă.
Teoria care consideră lumina ca o substanţă pare a se verifica strălucit în toate aceste cazuri, deşi necesitatea introducerii atîtor substanţe cîte culori există, are ceva neplăcut. Ipoteza că toate corpusculele de lumină au exact aceeaşi viteză în vid, pare de asemenea foarte artificială.
Ne putem închipui că şi un alt sistem de ipoteze (o teorie cu un caracter cu totul diferit) va putea da rezultate tot atît de bune, furnizînd toate explicaţiile cerute. în fapt, vom asista, în curînd, la ascensiunea altei teorii, care, deşi bazată pe idei cu totul diferite, va explica totuşi acelaşi domeniu al fenomenelor optice. înainte de a formula presupunerile pe care se sprijină această nouă teorie, trebuie să răspundem la o întrebare, care nu are nici o legătură cu aceste consideraţii optice. Trebuie să ne întoarcem la mecanică şi să întrebăm :
§ 17. CE ESTE O UNDĂ ?
O ştire difuzată, de exemplu, la Washington ajunge foarte repede la New York, chiar dacă nici una din persoanele care iau parte la răspîndirea ei nu s-a deplasat dintr-un oraş in celălalt. Avem de a face aici cu două mişcări absolut distincte : aceea a ştirei (ce pleacă) de la Washington la New York pe de o parte şi aceea a persoanelor care-o răşpînrlpsc pe de altă parte. Vîntul tre-cînd printr-un lan de grîu dă naştere unei unde care se răspîndeşte pe tot cuprinsul lanului. Din nou trebuie să facem distincţie între mişcarea undei şi mişcarea fiecărui
6 — Evoluţia fizicii
36
Evoluţia fizicii
spic in parte, care execută doar mici oscilaţii. Fiecare dintre noi am văzut undele care aleargă în cercuri tot mai mari cînd se aruncă o piatră într-un lac Mişcarea undei este foarte diferită de aceea a particulelor de apă. Particulele se mărginesc să salte în sus şi în jos. Mişcarea observată a undei este numai propagarea unei stări a materiei, nu mişcarea materiei însăşi. Un dop de plută care pluteşte pe lac ilustrează foarte limpede faptul acesta, deoarece el saltă în sus şi în jos, imitînd mişcarea reală a apei, fără să fie dus de către undă.
Pentru a înţelege mai bine mecanismul formării undei să ne referim tot la o experienţă idealizată. Să presupunem că un spaţiu mare este umplut uniform cu apâ, aer sau un alt „mediu". Cam în centrul vasului este o rferă. La încjeperea experienţei totul este nemişcat. Brusc, sfera începe să „respire" ritmic, dilatîndu-şi şi contractîndu-şi volumul, dar păstrînd forma sferică. Ce se întîmplă în mediu ? Să începem observaţia în momentul cînd sfera1 începe să se umfle. Particulele mediului din imediata vecinătate a sferei sînt

împinse în lături astfel că densitatea stratului de apă sau aer, după caz, va creşte faţă de valoarea ei normală. Asemănător, cînd sfera se strînge, densitatea mediului în imediata sa vecinătate va descreşte. Aceste variaţii ale densităţii se propagă în întregul mediu. Particulele care alcătuiesc mediul execută numai mici oscilaţii, dar mişcarea de ansamblu este o undă progresivă. Elementul nou, esenţial, este aici faptul că pentru prima oară avem de a face cu mişcarea a ceva ce nu este materie, ci energie care se propagă străbătînd materia.
Folosindu-ne de exemplul sferei care pulsează putem introduce două noţiuni fizice generale, importante pentru caracterizarea undelor. Prima este viteza cu oare se răs-pîndesc undele. Ea depinde de mediu, prin urmare este diferită pentru apă şi aer de exemplu. A doua noţiune este lungimea de undă. In cazul undelor mării sau rîurilor, ea este distanţa dintre valea unei unde şi valea undei următoare sau dintre crestele a două unde consecutive. Astfel, valurile (undele) mării au lungimea de undă mai -nare decît valurile (undele) rîurilor. în cazul undelor noastre, produse de către sfera care pulsează, lungimea de undă

este distanţa, la un moment dat, dintre două straturi sferice consecutive, care prezintă un maximum sau minimum de densitate. Este evident că această distanţă nu depinde numai de mediu. Ritmul pulsaţiei sferei va avea, de bună seamă, o influenţă hotărîtoare, lungimea de undă micşorîndu-se dacă pulsarea se iuţeşte şi mărindu-sc, dacă eai devine mai rară.
Acest concept de undă s-a dovedit plin de succes în fizică. El este prin excelenţă un concept mecanicist. Fenomenul este redus la mişcarea particulelor dare, conform cu teoria cinetică, sînt constituienţii materiei. Deci, orice teorie care foloseşte conceptul de undă poate fi privită, în general, ca o teorie mecanicistă. De exemplu, explicarea fenomenelor acustice se bazează esenţial pe acest concept. Corpurile care vibrează ca, de exemplu, coardele vocale sau strunele viorii sînt izvoare de unde sonore care se propagă prin aer în modul 'expus în exemplul cu sfera care pulsa. Astfel, este posibil să reducem toate fenomenele acustice la fenomene mecanice, prin noţiunea de undă.
S-a accentuat că trebuie să facem o deosebire între mişcarea particulelor şi mişcarea undei însăşi, care este o stare a mediului. Cele două mişcări Fig. 37 sînt foarte diferite, dar
în exemplul sferei care pulsa este evident că ele se desfăşură, amîndouă, in lungul aceleiaşi drepte. Particulele mediului oscilează de-a lungul unor segmente scurte şi densitatea creşte şi descreşte periodic în ritmul acestei mişcări. Direcţia în care se propagă unda coincide cu dreapta in lungul căreia au loc oscilaţiile, (fig. 37). Tipul acesta de unde poartă numele de unde longitudinale. Este

însă acesta singurul fel de unde ? Este important, pentru consideraţiile care vor urma, să ne dăm seama că pot exista şi altfel de unde, numite unde transversale.
Să modificăm puţin exemplul de mai sus. Avem tot o sferă dar să o presupunem cufundată într-un mediu de altă natură, un soi de gelatină, în loc de aer sau apă. Să mai presupunem că de astădată sfera nu pulsează, ci execută mici rotaţii : întîi într-un sens, apoi îndărăt,
Unda se propagă în direcţia razei sferei, în timp ce porţiunile mediului se mişcă perpendicular pe această direcţie. A luat naştere astfel o undă transversală (fig. 33). Undele care se răspîndesc pe suprafaţa apei sînt transversale. O bucăţică de plută saltă numai în sus şi în jos, în vreme ce unda se propagă într-un plan orizontal. Undele sonore în schimb ne furnizează exemplul cel mai familiar de unde longitudinale.
încă o observaţie : unda produsă de o sferă care pulsează sau oscilează într-un mediu omogen este o undă sferică. Ea se numeşte astfel deoarece la un moment dat toate punctele situate pe oricare sferă cu centrul în sursă se comportă la fel. Să considerăm o porţiune dintr-o astfel de sferă, situată la mare depărtare de izvor. Cu cît porţiunea este mai îndepărtată şi mai mică, cu atît poate
Fig.38
mereu în acelaşi ritm şi în jurul unei axe fixe. Gelatina aderă la sferă; ca urmare, porţiunile aderente sînt nevoite să imite mişcarea sferei. Acestea, la rîndul lor, silesc pe

cele situate puţin mai departe să imite aceeaşi mişcare şi aşa mai departe, astfel că în mediu se porneşte o undă. Dacă ne gîndim la deosebirea dintre mişcarea mediului şi mişcarea undei, vedem că aici ele nu se află amîn-două pe aceeaşi direcţie.

fi mai bine asimilată cu un plan (fig. 39). Putem vedea, fără a încerca să fim prea riguroşi, că nu este o diferenţă esenţială între o porţiune a unui plan şi o parte din suprafaţa unei sfere cu raza destul de mare. Foarte des vorbim de porţiuni mici ale unei unde sferice foarte depărtate de izvor, ca despre unde plane. Cu cît por ţiu-
n
Fig. 39
nea haşurată din schiţa noastră este situată mai departe de centrul sferei şi cu cît unghiul format de către cele două raze este mai mic, cu atît reprezentarea aceasta a unei unde plane este mai bună. Conceptul de undă plană, ca multe alte concepte fizice, nu este decît o ficţiune, care poate fi realizată numai cu un anumit grad de aproximaţie. Totuşi, noţiunea aceasta este utilă şi ne va fi necesară mai departe.
§ 18. TEORIA ONDULATCRIE A LUMINII
Să ne amintim de ce am întrerupt descrierea fenomenelor optice. Scopul nostru era să introducem o nouă teorie a luminii, diferită de acea corpusculară, care-şi propune să explice, de asemenea, acelaşi domeniu de fapte. Pentru aceasta a fost nevoie să întrerupem povestirea şi să introducem noţiunea de „undă". Acum putem să ne întoarcem la subiectul nostru.
Huygens, un contemporan al lui Newton, a fost acela care a promovat o teorie cu totul nouă. în tratatul său despre lumină, el scrie :

„Dacă, în afară de aceasta, lumina are nevoie de timp pentru propagare — ceea ce vom cerceta numaidecît — urmează că mişcarea aceasta, imprimată materiei în cauză, este o mişcare din a-proape în aproape ; prin urmare, ea se propagă ca şi sunetul prin suprafeţe şi unde sferice, căci le numesc unde din cauza asemănării lor cu cele care se formează în apa în care aruncăm o piatră şi care se răspîndesc sub formă de cercuri care se nasc unul după altul, numai că ele apar din altă cauză şi sînt situate numai pe un strat subţire, la suprafaţă".
După Huygens lumina este o undă, o transmisie d* energie şi nu de substanţă. Am văzut că teoria corpus-culară explică multe din faptele observate. Teoria on-dulatorie este şi ea capabilă de aceasta? Trebuie să repetăm întrebările cărora le dăduse un răspuns teoria cor-pusculară pentru a vedea dacă teoria ondulatorie poate să răspundă tot atît de bine. Vom face aceasta sub forma unui .dialog intre N, un adept al teoriei corpusculare a lui Newton, şi H, un adept al teoriei lui Huygens. Nici unuia din ei nu-i este îngăduit să folosească argumente posterioare operei celor doi mari maeştri.
N : în teoria corpusculară viteza luminii are o semnificaţie foarte bine definită. Este viteza cu care corpus-culele străbat vidul. Ce reprezintă ea în teoria ondulatorie ?
H : Ea reprezintă, bineînţeles, viteza undei de lumină. Orice undă cunoscută se propagă cu o viteză bine definită ; şi la fel face o undă de lumină.
N : Nu este chiar atît de simplu, cum pare. Undele sonore se propagă în aer, valurile mării în apă. Fiecare undă are nevoie de un mediu material prin care să călătorească. Lumina însă trece prin vid, ceea ce sunetul nu poate. A ne închipui o undă în vid, înseamnă a nu realiza în fond nici o undă.
H: Este drept, aceasta e o dificultate care nu este însă nouă pentru mine. Maestrul meu a reflectat mult asupra acestei chestiuni şi a ajuns la concluzia că singura ieşire din impas este să presupunem existenţa unei substanţe ipotetice, eterul, un mediu transparent, care îmbibă întregul Univers. Universul, ca să zicem aşa, înoată în eter. De îndată ce am avut îndrăzneala să introducem această noţiune, totul devine limpede şi plauzibil.

N : Protestez împotriva unei atari presupuneri. în primul rînd ea introduce o nouă substanţă ipotetică şi de pe acum avem prea multe substanţe în fizică. Dar mai este o obiecţie împotriva ei. Sînteţi fără îndoială convins că trebuie să explicăm orice fenomen prin procese mecanice. Or, cum se împacă aceasta cu eterul? Puteţi să răspundeţi la

întrebarea simplă cum este alcătuit eterul din particule elementare şi cum îşi manifestă el existenţa în alte fenomene?
H : Prima obiecţie este desigur întemeiată, însă in-troducînd noţiunea, cam artificială, de eter lipsit de greutate, am scăpat dintr-o dată de noţiunea mult mai artificială de corpuscul de lumină. Avem de a face numai cu o singură substanţă „misterioasă44 în locul unui număr infinit de substanţe, corespunzînd numărului mare de culori din spectru. Nu consideraţi acest lucru un progres real? Cel puţin, am concentrat toate dificultăţile într-un singur punct. Nu mai avem nevoie cie presupunerea artificială că particule care corespund la diferite culori străbat vidul cu aceeaşi viteză. Al doilea argument este de asemenea întemeiat. Nu putem da o explicaţie mecanică eterului. Dar nu încape îndoială că studiul viitor al opticii, şi poate şi alte fenomene, vor dezvălui structura lui. Deocamdată trebuie să aşteptăm noi experienţe şi deducţii, dar sper că în cele din urmă vom reuşi să lămurim problema structurii mecanice a eterului.
N: Să părăsim deocamdată chestiunea, deoarece tot nu o putem încă definitiva. Aş dori să ştiu cum explică teoria dumneavoastră, chiar lăsînd la o parte dificultăţile, acele fenomene care sînt atît de clare şi lesne de înţeles în lumina teoriei corpusculare. Să examinăm, de pildă, faptul că razele de lumină se propagă în linie dreaptă în vid sau în aer. O bucată de hîrtie aşezată înaintea unei luminări aruncă pe perete o umbră distinctă şi net conturată. Dacă teoria ondulatorie ar fi adevărată, atunci nu s-ar putea forma umbre nete, căci undele ar trebui să se încon-voaie pe muchia hîrtiei, dînd o umbră neprecis conturată pe perete. Ştiţi doar că o barcă mică nu constituie un obs-stacol pentru valurile mării; ele o ocolesc pur şi simplu, fără a arunca vreo umbră.
H : Acesta nu este un argument convingător. Să ne

gîndim la nişte valuri mărunte de rîu, care izbesc un vapor din coastă. Valurile care iau naştere de o parte a vasului nu apar in partea cealaltă. Dacă undele sînt destul de mici şi vasul destul de mare, atunci în spatele vasului apare o umbră foarte distinctă. Este foarte probabil că lumina dă impresia că se propagă în linie dreaptă, numai din cauză că lungimea ei de undă este foarte mică în comparaţie cu mărimea obstacolelor şi a orificiilor folosite in mod obişnuit în experienţe. Poate că dacă am putea construi un ecran destul de mic, umbra nu s-ar mai forma de loc. S-ar putea să întîmpinăm mari greutăţi la construirea unui aparat cu care să se poată stabili dacă lumina este sau nu capabilă să ocolească obstacolele. In schimb, dacă o asemeneaf experienţă ar putea fi imaginată, ea ar fi crucială pentru teoria ondulatorie şi teoria corpusculară a luminii.
N : S-ar putea ca teoria ondulatorie să conducă la fapte noi în viitor, dar nu am cunoştinţă de nici un fel de date experimentale care ar putea să o confirme în mod convingător în stadiul actual. Cîtă vreme nu este dovedit experimental, în mod precis, că lumina poate ocoli obstacolele, nu văd nici o raţiune pentru a nu continua să cred în teoria corpusculară caîe îmi pare mai simplă şy deci mai bună decît teoria ondulatorie.
Aici putem întrerupe dialogul, cu toate că tema nu este cîtuşi de puţin epuizată. Rămîne de arătat cum explică teoria ondulatorie refracţia razelor şi varietatea culorilor. După cum ştim, teoria corpusculară este capabilă să facă aceasta. Vom începe cu refracţia, dar va fi util să considerăm mai întiî un exemplu, care nu** are nimic de a face cu .optica.
Tntr-un spaţiu deschis, mare, înaintează doi oameni, ţinînd fiecare un capăt al unei prăjini rigide. La început, ei merg drept înainte, amîndoi cu aceeaşi viteză. Cîtă vreme vitezele lor rămîn aceleaşi, fie ele mari sau mici, prăjina va suferi numai deplasări paralele, adică nici nu se va roti, nici nu-şi va schimba direcţia. Toate poziţiile succesive ale prăjinii vor fi paralele între ele. Dar, să presupunem acum că un răstimp, care poate fi scurt cît o fracţiune de secundă, oamenii nu merg la fel de repede. Ce se va întîmplă? Este limpede că în intervalul acesta,.

Fig. 40
prăjina se va roti astfel că nu se va mai deplasa paralel cu poziţia ei iniţială. După ce vitezele vor fi redevenit egale, direcţia de înaintare va fi diferită de cea de la început (fig. 40). Aceasta se vede clar în figură. Schimbarea direcţiei s-a produs în intervalul de timp în care vitezele celor două persoane fuseseră diferite.

Exemplul acesta ne permite să înţelegem refracţia unei unde. Să considerăm o undă plană, care străbate eterul căzînd apoi pe o placă de sticlă. Figura următoare (fig. 41) ne arată o undă care înaintează pe un front relativ larg. Frontul de undă este un plan de-a lungul căruia toate părţile eterului se comportă exact la fel într-un moment £at. Cum viteza depinde de mediul prin care trece lumina, în sticlă ea va fi alta decît în vid. In intervalul de timp foarte scurt, în care frontul undei pătrunde în sticlă, regiuni diferite ale lui vor avea viteze diferite. Este-
limpede că porţiunea care a ajuns la sticlă va merge mai departe cu viteza luminii în sticlă, în/ timp ce celelalte părţi ale undei îşi vor continua drumul cu viteza luminii în eter. Din cauza existenţei acestei diferenţe de viteză în lungul frontului de* undă în timpul unda „pătrunde" sticlă, direcţia ei schimbă.
Fig. 41
cît în se
Vedem deci că nu numai teoria corpusculară, ci şi-teoria ondulatorie conduce la o explicare a refracţiei..
40
Evoluţia fizici*
Consideraţii suplimentare, împreună cu puţină matematică, arată că explicaţia teoriei ondulatorii este mai simplă şi mai bună şi că toate consecinţele ei sînt în deplină concordanţă cu observaţiile. în adevăr, metode cantitative de raţionament ne dau posibilitatea să deducem viteza luminii într-un mediu refringent, dacă ştim cum se refractă raza cînd pătrunde în el. Măsuri directe confirmă, intr-un mod strălucit, aceste prevederi şi, prin urmare, însăşi teoria ondulatorie a luminii.
Mai rămîne problemă culorii.
Trebuie să amintim că o undă este caracterizată prin două numere, viteza ei şi lungimea ei de undă. Ipoteza esenţială a teoriei ondulatorii a luminii este că unor culori diferite, le corespund lunigimi de undă diferite. Lungimea de undă a culorii omogene galbene este alta decît cea a roşului sau a violetului. In locul diferenţierii artificiale a corpusculelor după culoarea căreia îi aparţin, avem diferenţa firească a lungimilor de undă.
Urmează că, pentru a descrie experienţele lui Newton asupra dispersiei luminii, se pot adopta dou^ limbaje diferite, limbajul teoriei corpusculare şi cel al teoriei ondulatorii. De exemplu :
Limbajul corpuscular Corpusculele care aparţin unor culori diferite au aceeaşi viteză în vid, dar viteze diferite în sticlă.
Lumina albă este un amestec de corpuscule aparţinînd unor culori diferite, care sînt însă separate în spectru.
Limbajul ondulator Razele cu lungimi de undă diferite, caracterizînd culori diferite, au aceeaşi viteză in eter. dar viteze diferite în sticlă.
Lumina albă este o suprapunere de unde de toate lungimile de undă, care în spectru sînt totuşi separate.
Ar fi de dorit să evităm ambiguitatea care decurge din existenţa a două teorii distincte asupra aceloraşi fenomene, optînd în favoarea uneia sau alteia, după o analiză atenta a calităţilor şi punctelor slabe ale fiecăreia. Dialogul dintre N şi H arată însă că aceasta nu este o sarcină uşoară. în stadiul acesta, o hotărîre ar fi mai mult o chestiune de preferinţă decît de convingere ştiinţifică, în timpul lui Newton şi în următorii peste 100 de ani, majoritatea fizicienilor au preferat teoria corpusculară.
PLANŞA II
(Fotografiate de V. Arkadiev)
Sus se văd două urme luminoase produse de două raze de lumină care trec prin două orificii, succesiv (un orificiu era descoperit şi altul închis şi apoi situaţia se inversa). Jos se văd benzile care apar în urma trecerii razeior de lumină simultan prin cele două fante.
(Fotografiate de Arkadiev V.)
Difracţia luminii în jurul Difracţia luminii care trece unui mic obstacol, printr-o fantă fină.
Declinul concepţiei mecaniciste
40
Istoria şi-a rostit verdictul ei în favoarea teoriei ondulatorii şi împotriva teoriei corpusculare, mult mai tîr-ziu, abia către mijlocul secolului al nouăsprezecelea. în discuţia sa cu H, N afirmase că, în principiu, este posibil să se decidă pe cale experimentală între

cele două teorii. Teoria corpusculară nu permite luminii să ocolească obstacolele şi cere ca umbrele să fie nete. Dimpotrivă, conform teoriei ondulatorii, un obstacol destul de mic ar trebuii să nu arunce de loc umbră. în lucrările lui Young şi Fresnel acest rezultat a fost obţinut experimental şi s-au tras concluziile teoretice corespunzătoare-
Am discutat mai înainte o experienţă foarte simplă, în care se punea în calea luminii emise de o sursă punctiformă un ecran prevăzut cu un orificiu, formîndu-se o umbră pe perete. Să simplificăm şi mai mult această experienţă, presupunînd că sursa emite lumină omogenă, Pentru a obţine rezultate cît mai bune, sursa trebuie să fie intensă. Să micşorăm din ce în ce orificiul ecranului. Dacă folosim o sursă puternică şi reuşim să facem deschiderea destul de mică, apare un fenomen nou şi surprinzător, absolut de neînţeles din punctul de vedere al teoriei corpusculare : nu mai apare distincţia precisă dintre lumină şi întuneric. Lumina se pierde treptat în fondul întunecat sub forma unui şir de inele luminoase şi întunecate. Formarea inelelor este foarte caracteristică pentru teoria ondulatorie. Explicarea zonelor alternativ luminoase şi întunecate devine foarte clară dacă schimbăm puţin condiţiile experienţei. Să presupunem că avem o foaie de hîrtie neagră cu două înţepături de ac, prin care trece lumina. Dacă găurelele sint foarte apropiate şi foarte mici, şi izvorul de lumină omogenă este destul de puternic, pe perete vor apărea multe dungi, alternativ luminoase şi întunecate, care se pierd treptat în fondul întunecat de o parte şi de alta a cîmpului. Explicaţia este simplă. O dung£ întunecată apare unde valea unei unde izvorîtă dintr-o gaură se suprapune peste creasta unei unde izvorîtă din cealaltă gaură, astfel încît cele două unde se sting reciproc. O dungă luminoasă apare unde valea undei izvorîtă dintr-o gaură se suprapune peste valea undei provenită din cealaltă gaură, sau creasta unei

unde peste creasta celeilalte, astfel că cele două unde se întăresc una pe alta. Explicaţia este mai complicată în cazul inelelor întunecate şi luminoase din exemplul precedent, în care am folosit un ecran cu un singur orificiu; principiul este însă acelaşi. Să reţinem formarea dungilor întunecate şi luminoase în cazul a două găuri mici şi a inelelor luminoase şi întunecate în cazul unei singure găuri, deoarece vom reveni asupra lor mai tîrziu. Experienţele descrise mai sus demonstrează difracţia luminii, adică abaterea ei de la propagarea rectilinie, abatere care se produce cînd în calea undei de lumină se interpun deschideri sau obstacole mici.
Cu puţină matematică putem merge mult mai departe. Putem stabili cît de mare, sau mai bine zis, cît de mică trebuie să fie lungimea de undă pentru ca să se formeze o figură anumită. Prin urmare, pe calea aceasta, experienţele permit să măsurăm lungimea de undă a luminii omogene folosită ca sursă. Pentru a da o idee de micimea lungimilor de undă, vom cita două valori repre-zentînd lungimile de undă ale extremităţilor spectrului solar, adică ale luminii roşii şi violete.
Lungimea de undă a luminii roşii este de 0,000 08 cm.
Lungimea de undă a luminii violete este de 0,000 04
cm.
Nu este cazul să rămînem uimiţi de micimea acestor numere. Fenomenul de umbră netă, adică fenomenul propagării rectilinii a luminii, se observă în natură tocmai din cauză că toate deschiderile şi obstacolele cu care avem de-a face în mod obişnuit sînt extrem de mari faţă de lungimile de undă ale luminii. Numai cînd intervin obstacole sau deschideri foarte mici, lumina îşi manifestă natura sa ondulatorie.
Dar povestirea căutării unei teorii a luminii nu este nicidecum sfîrşită. Verdictul secolului al nouăsprezecelea nu a fost nici definitiv nici ultimul. Fizicianului modern i se prezintă din nou întreaga problemă a alegerii intre corpuscule şi unde, de data aceasta sub o formă mult mai adîncă şi mai complicată. Să acceptăm deocamdată în-frîngerea teoriei corpusculare a luminii, pînă cînd ne vom da seamă cît de problematică este victoria teoriei ondulatorii.
Declinul concepţiei mecaniciste

§ 19. UNDELE DE LUMINA SÎNT LONGITUDINALE SAU TRANSVERSALE ?
Toate fenomenele optice pe care le-am considerat pledează pentru teoria ondulatorie a1 luminii. Ocolirea obstacolelor de către lumină şi explicarea refracţiei sînt cele mai puternice argumente în favoarea ei. Dacă ne lăsăm - călăuziţi de punctul de vedere

mecanicist, vom constata că a rămas o chestiune deschisă : precizarea proprietăţilor mecanice ale eterului. Pentru rezolvarea acestei probleme este esenţial să ştim dacă undele de lumină care se propagă în eter sînt longitudinale sau transversale. Cu alte cuvinte : lumina se propagă ca sunetul? Adică unda este datorită variaţiei densităţii mediului, oscilaţiile particulelor făcîndu-se deci pe direcţia de propagare? Sau eterul se aseamănă cu o gelatină elastică, un mediu în care se pot propaga numai unde transversale şi ale cărui particule se mişcă perpendicular pe direcţia în care înaintează unda însăşi?
înainte de a rezolva această problemă să stabilim care este răspunsul ce ne-ar conveni mai mult. Bineînţeles, am fi încîntaţi dacă undele de lumină ar fi longitudinale. Dificultăţile întîmpinate la descrierea modelului mecanic al eterului ar fi mult mai mici în acest caz. Imaginea pe care ne-am face-o despre eter ar fi foarte probabil în genul modelului mecanic al unui gaz, model caro explică propagarea sunetului. Mult mai dificilă ar fi imaginea unui eter capabil să transmită unde transversale. Nu este lucru uşor să ne reprezentăm o gelatină în chip de mediu constituit din particule, în aşa fel încît prin intermediul lui să se poată propaga unde tranversale. Huygens credea ca eterul se va dovedi a fi de „tipul aerului", nu de tipul „gelatinei". Dar naturii puţin îi pasă de ceea ce-i dictăm noi. S-a arătat natura clementă faţă de fizicienii care au încercat să interpreteze din punctul de vedere mecanic tot ce se întîmplă ? Pentru a răspunde la această întrebare ar trebui să discutăm alte noi experienţe.
Vom considera, mai amănunţit, numai una din numeroasele experienţe care ar putea să ne aducă o lămurire. Să presupunem că avem o placă foarte subţire, tăiată dintr-un cristal de turmalină, într-un mod anumit pe care

nu este necesar să-1 descriem aici. Placa nu trebuie să fie atît de subţire, încît să se poată vedea prin ea un izvor luminos. Să luăm două plăci de acestea şi să le int?r-punem amîndouă între ochi şi sursa de lumină. Ce ne-am aştepta să vedem ? Tot un punct luminos, admiţînd că
plăcile sînt destul de subţiri. Sînt multe şanse, ca experienţa să confirme aşteptările noastre. Să nu ne preocupăm de sensul afirmaţiei că există şanse şi să presupunem că vedem în fapt punctul luminos prin ambele cristale. Să schimbăm acum poziţia unuia din cristale, rotindu-1. Această precizare are sens numai dacă poziţia axului de rotaţie este bine definită. Vom alege drept ax linia determinată de raza incidenţă. Aceasta înseamnă că se vor deplasa toate punctele cristalului rotit, a-fară de cele situate pe ax. Se petrece un lucru straniu ! Lumina se stinge din ce în ce, pînă cînd dispare complet. Continuînd să rotim cristalul, ea va reapare şi cînd vom ajunge din nou în poziţia iniţială o vom vedea tot atît de bine ca la început (fig. 42).
Fără a intra în amănuntele acestei experienţe şi a altora asemănătoare, ne putem totuşi întreba : se pot explica aceste fenomene dacă undele de lumină sînt longitudinale ? în cazul unor unde longitudinale, particulele eterului s-ar mişca în lungul axei, ca şi raza. Or, prin rotirea cristalului, în lungul axului nu se schimbă nimic. Punctele de pe ax nu se deplasează de loc şi numai în vecinătatea axului au loc deplasări foarte mici. O schimbare atît de radicală ca dispariţia sau leapariţia unei imagini nu s-ar putea produce în cazul unei unde longitudinale. Fenomenul acesta ş4 multe altele asemănătoare pot fi explicate numai în ipoteza că undele de lumină sînt transversale şi nu longitudinale ! Sau, cu alte cuvinte, trebuie să presupunem că eterul este de tipul „gelatinei".
Fig. 42
Declinul concepţiei mecaniciste

Acesta este foarte trist ! Trebuie să fim gata să înfruntăm dificultăţi uriaşe în încercarea de a descrie, din punct de vedere mecanic, eterul.
§ 20. ETERUL ŞI CONCEPŢIA MECANICISTA
Discutarea diferitelor încercări de a interpreta eterul ca mediu carp transmite lumina este o poveste lungă. O imagine mecanică implică particule care interacţionează cu forţe îndreptate de-a lungul liniilor care le unesc şi forţe care depind numai de distanţă. Pentru a-şi putea imagina eterul ca substanţă mecanică „gelatinoidă". fizicienii au fost nevoiţi să facă unele, presupuneri, extrem de artificiale şi nefireşti. Nu le vom cita aici ; ele aparţin, unui trecut aproape dat uitării. Ele au avut însă o urmare foarte importantă. Necesitatea

introducerii atîtor presupuneri cu totul independente una de alta, caracterul lor artificial, au avut drept efect zdruncinarea credinţei în punctul de vedere mecanicist.
Dar există şi alte obiecţii împotriva eterului, mai simple chiar decît însăşi dificultatea constituţiei lui. Din moment ce ne-am propus să explicăm toate fenomenele optice din punctul de vedere mecanic, trebuie să admitem că eterul există pretutindeni. Nu poate exista vid dacă este adevărat că lumina nu se poate propaga decît într-un mediu.
Or, ştim din mecanică că spaţiul interstelar nu opune rezistenţă mişcării corpurilor materiale. Planetele, de exemplu, străbat eterul ce se aseamănă cu gelatina, fără a întîmpina vreo rezistenţă, cum' ar fi de aşteptat în cazul unui mediu material. Dar dacă eterul nu perturbă mişcarea materiei, înseamnă că nu poate exista o interacţiune între particule]p de eter şi particulele de materie. De altă parte, lumina trece prin eter, de asemenea prin sticlă şi apă, dar viteza ei este diferită în cele două substanţe din urmă. Care ar putea fi justificarea mecanică a acestui fapt ? Evident, numai o interacţiune oarecare între particulele de eter şi particulele de materie. Dar am stabilit că în cazul corpurilor care se mişcă liber, trebuie să cludem posibilitatea unei astfel de interacţiuni. Cu alte
#6
Evoluţia fizicii
cuvinte ar exista o interacţiune între eter şi materie in fenomenele optice şi nici una în fenomenele mecanica. Aceasta este o concluzie cu totul paradoxală î
S-ar părea că există o singură ieşire din această dilemă, în cadrul încercărilor de a interpreta fenomnele naturii din punctul de vedere mecanicist, a fost necesar în lot cursul dezvolării ştiinţei, pînă în pragul secolului al douăzecelea, să se introducă substanţe artificiale, ca fluidul electric şi cel magnetic, corpusculele de lumină sau eterul. Rezultatul obţinut a fost mai curînd concentrarea tuturor dificultăţilor în cîteva puncte esenţiale, cum a fost eterul, în cazul fenomenelor optice. Tcate încercările infructuoase de a ajunge la o reprezentare a eterului într-un mod simplu, precum şi alte obiecţii, par a arăta că greşeala rezidă în presupunerea fundamentală că toate evenimentele din natură ar putea fi explicate din punctul de vedere mecanicist. Ştiinţa nu a reuşit să înfăptuiască în întregime, în mod plauzibil, programul mecanicismului şi azi nici un fizician nu mai crede în posibilitatea realizării lui.
în scurta noastră trecere în revistă a principalelor idei fizice am întîlnit unele probleme nerezolvate şi am întîmpinat dificultăţi şi obstacole care au descurajat încercările de a formula o interpretare unitară şi consecventă a tuturor fenomenelor lumii exterioare. Am întîlnit astfel o cheie neobservată în mecanica clasică, a identităţii dintre masa gravitaţională şi masa inertă. Ne-am izbit apoi de caracterul artificial al fluidelor electrice şi magnetice. O altă dificultate nerezclvată a fost interacţiunea dintre curentul electric şi acul magnetic. Vom aminti că această forţă nu acţiona în lungul liniei car^ unea sîrma cu polul magnetic şi că depindea de viteza sarcinii în mişcare. Legea care exprima direcţia şi intensitatea acestei forţe era extrem de complicată. Şi, în sfîrşit, am întîmpinat marea dificultate a eterului.
Fizica modernă a atacat toate aceste probleme şi le-a rezolvat. Dar, în lupta pentru dobîndirea acestor soluţii, s-au născut alte probleme şi mai profunde. Cunoştinţele noastre sînt cu mult mai vaste şi mai profunde decît cele ale fizicianului din secolul al XlX-lea, tot astfel însă şi îndoielile şi dificultăţile noastre.
Declinul concepţiei mecaniciste
43
Rezumăm :
în vechile teorii ale fluidelor electrice, teoriile corpusculare şi ondulatorii ale luminii, am încercat să aplicăm punctul d& vedere mecanicist. Dar în domeniul fenomenelor electrice şi optice am întîlmt grave dificultăţi în această aplicare.
O sarcină în mişcare acţionează asupra acului magnetic. Dar forţa, în loc să depindă numai de distanţă, depinde şi de viteza sarcinii. Forţa nu este nici de respingere nici de atracţie, ci acţionează perpendicular pe linia care uneşte acul cu sarcina.
în optică a trebuit să ne decidem în favoarea teoriei ondulatorii şi împotriva teoriei corpusculare a luminii. Unda ce se răspîndeşte într-un mediu constituit din particule între care acţionează forţe mecanice este fără îndoială un concept mecanic. Care este însă mediul prin care se propagă lumina şi care sînt proprietăţile lui mecanice ? Nu există nici o speranţă de a reduce fenomenele optice la fenomene mecanice, cită vreme nu s-a dat

un răspuns la această întrebare. Dar, dificultăţile ridicate de rezolvarea acestei probleme sînt atît de mari, încît ne vedem siliţi să o părăsim şi astfel, totodată, să părăsim şi concepţiile mecaniciste.

III. CÎMP, RELATIVITATE

Cîmpul ca reprezentare. — Cei doi stîlpi ai teoriei cîmpului. — Realitatea cîmpului. — Cîmpul şi eterul. — Sistem de referinţă. — Eterul şi mişcarea. — Durată, distanţă, relativitate. — Relativitatea şi mecanica. — Continuumul ^pa-ţiu-timp. — Relativitatea generală. — In exteriorul şi în interiorul unui ascensor. — Geometrie şi experienţă. — Relativitatea generală şi verificarea ei. — Cîmp şi materie.

§ 21. CÎMPUL CA REPREZENTARE

In cursul celei de a doua jumătăţi a secolului a! XlX-lea s-au introdus în fizică idei noi şi revoluţionare ; ele au deschis calea unei concepţii filosofice noi, diferită de acea mecanicistă. Rezultatele lucrărilor lui Faraday, Maxwell şi Hertz au dat un impuls dezvoltării fizicii moderne, ducînd la clrearea unor noţiuni noi din care a rezultat o nouă imagine a realităţii.

Sarcina noastră actuală este să descriem cotitura provocată în ştiinţă de aceste noi concepte şi să arătăm cum au cîştigat treptat în claritate si rigurozitate. Vom încerca să reconstituim linia progresului în mod logic, fără a ne preocupa prea mult de succesiunea cronologică.

Noile concepte s-au format în legătură cu fenomenele din electricitate, dar este mai simplu să le introducem, mai întîi, prin intermediul mecanicii. Ştim că două particule se atrag şi că forţa de atracţie dintre ele descreşte cu pătratul distanţei. Putem reprezenta acest fapt într-un nou mod, ceea ce vom şi face, deşi este greu să apreciem de la început avantajele lui. Micul cerc din fig. 43 reprezintă un corp atractiv, de exemplu Soarele. în realitate, trebuie să ne imaginăm diagrama noastră ca un model

în spaţiu, nu ca o figură plană. Micul nostru cerc reprezintă prin urmare o sferă în spaţiu, Soarele. Un corp, aşa-numitul corp de probă, adus undeva în vecinătatea Soarelui, va fi atras în lungul liniei care uneşte centrul lui cu centrul Soarelui. Liniile din figură indică direcţia forţei de atracţie a Soarelui pentru diferite poziţii ale corpului de probă. Săgeata fiecărei linii arată că forţa este îndreptată spre Soare, ceea ce denotă că ea este de atracţie. Acestea sînt liniile de forţă ale cîmpului gravitaţional. Pentru moment, aceasta reprezintă numai o denumire şi nu avem nici o Fig. 43 justificare pentru a insista asupra ei. Figura noastră are însă o caracteristică asupra căreia vom reveni mai tîrziu. Liniile de forţă sînt trasate în spaţiul unde nu există materie. Pentru moment, toaţejmule^d^ indică numai cum s-ar comporta un corp de probă adus în vecinătatea sferei pentru care a fost construit cîmpul.

Liniile din modelul nostru în spaţiu sînt mereu perpendiculare pe suprafaţa sferei. Deoarece ele converg către un singur punct, sînt dese în apropierea sferei şi devin din ce în ce mai rare cu cît ne îndepărtăm de ea. Dacă distanţa de la sferă creşte de două sau de trei ori, densitatea liniilor, în modelul nostru spaţial (dar nu şi în schiţă), va deveni de patru sau de nouă ori mai mică. Prin urmare, liniile de forţă au o dublă funcţiune. De o parte, ele indică directia^|CTţjei care acţionează asunra unui corp adus în v^îriatatea sferei-Soare. De altă parte, prin densitatea lor spaţială, ele ne arată cum ^-variază foFţa-cu_jlistanţa, Prin urmare, reprezentarea grafică a cîmpului, corect interpretată, indică direcţia forţei gra

vitaţionale precum şi dependenţa ei de distanţă. Putem citi legea gravitaţiei dintr-un astfel de desen tot atît de bine ca din descrierea ei în cuvinte sau în limbajul precis şi economic al matematicii. Reprezentarea prin cîmp, aşa cum o vom numi de aici înainte, poate părea clară şi interesantă dar nu avem nici o raţiune să considerăm că ea reprezintă un progres real. Ar fi foarte greu să dovedim utilitatea ei în cazul gravitaţiei. Unii vor găsi poate util să vadă în aceste linii mai mult decît un simplu desen presupunînd că acţiunile reale ale forţelor se exercită în lungul lor. S-ar putea admite acest lucru, dar atunci vitezele acţiunilor în lungul liniilor de forţă ar trebui presupuse infinit de mari ! Forţa dintre două corpuri, potrivit legii lui Newton, depinde numai de distanţă ; timpul nu intervine în reprezentare. Forţa ar trebui deci să treacă instantaneu de la un corp la

celălalt ! Dar, cum mişcarea cu viteză infinită nu poate avea nici o semnificaţie pentru un om cu judecată normală, încercarea de a face din desenul nostru mai mult decît un model nu duce la nimic.
Nu avem, totuşi, intenţia să discutăm acum problema gravitaţiei. Cele de mai sus ne-au slujit numai drept introducere, simplificînd explicarea unor metode de raţio-hament similare din teoria electricităţii.
Vom începe cu discutarea experienţei care a creat dificultăţi serioase interpretării noastre mecaniciste. Era vorba de un curent care trece printr-un circuit în formă de cerc (printr-o spiră circulară). în mijlocul circuitului era aşezat un ac magnetic. în momentul cînd începea să curgă curentul, apărea o forţă care acţiona asupra polului magnetic, perpendicular pe fiecare linie care unea polul cu sîrma. Cînd această forţă era determinată de o sarcină in mişcare, ea depindea de viteza sarcinii, cum a arătat experienţa lui Rowland. Aceste fapte experimentale contraziceau concepţia filosofică potrivit căreia toate forţele trebuie să acţioneze în lungul liniilor care unesc particulele şi nu pot depinde decît de distanţă.
Expresia exactă a forţei pe care o exercită un curent asupra unui pol magnetic este foarte complicată, mult mai complicată decît cea a forţei gravitaţionale. Să încercăm totuşi să ne facem o imagina concretă a acţiunii ca şi în

cazul forţei gravitaţionale. Trebuie să răspundem la întrebarea : cu ce forţă acţionează curentul asupra unui pol magnetic situat undeva în vecinătatea lui ? Ar fi destul de anevoios să descriem această forţă în cuvinte. Chiar o formulă matematică ar fi complicată şi greoaie. Este mai bine să reprezentăm tot ce ştim despre forţele care acţio-
Fig. 44
nează, printr-un desen sau mai degrabă printr-un model spaţial cu linii de forţă. O oarecare dificultate o constituie faptul că un pol magnetic nu există decît legat de alt pol magnetic, formînd amîndoi un dipol. Ne putem totuşi imagina întotdeauna acul magnetic de ajuns de lung ca să nu fie nevoie să ţinem seama decît de forţa care acţionează asupra polului situat mai aproape de curent. Celălalt pol ar fi, în aceste condiţii, destul de departe pentru a se putea neglija forţa care se exercită asupra lui. Pentru a evita ambiguitatea vom conveni că polul magnetic situat mai aproape de sîrmă este cel pozitiv.
Caracterul forţei care acţionează asupra polului magnetic pozitiv apare explicit în figura noastră (fig. 44).
Observăm, în primul rinfl, mai multe săgeţi lîngă sîrmă, indicînd sensul curentului, de la potenţialul mai înalt către cel mai jos. Celelalte linii sînt tcate linii de forţă aparţinind acestui curent, situate într-un anumit plan. Trasate convenabil, ele ne indică direcţia vectorului-forţă. care reprezintă acţiunea curentului asupra unui pol mag

netic pozitiv dat, spunîndu-ne totodată şi ceva despre lungimea acestui vector. Forţa, după cum ştim, este un vector şi pentru a o determina trebuie să-i cunoaştem atît orientarea cît şi lungimea. Ne vom ocupa, în special, cu problema direcţiei forţei care acţionează asupra unui pol. întrebarea noastră este : cum putem găsi, din reprezentare, direcţia forţei în fiecare punct al spaţiului ?
Regula pentru aflarea direcţiei forţei cu ajutorul unui asemenea model nu este tot atît de simplă ca în exemplul nostru precedent, în care liniile de forţă erau drepte. în diagrama următoare este trasată numai o singură linie de forţă pentru a lămuri procedeul (fig. 45). Vecto-rul-forţă este situat în lungul tangentei la linia de forţă, cum se arată în schiţă. Săgeata vectorului-forţă şi săgeţile liniei de forţă sînt îndreptate în aceeaşi direcţie. Aceasta este
Fig. 45
deci direcţia în care acţionează forţa
asupra unui pol magnetic în acest punct. Un desen bun sau, mai curînd, un model bun ne spune ceva şi despre lungimea vectorului-forţă, în fiecare punct. Acest vector trebuie să fie mai lung unde liniile sînt mai dese, adică aproape de sîrmă, şi mai scurt unde liniile sînt mai rare, adică departe de sîrmă.
în felul acesta liniile de forţă, sau, cu alte cuvinte, cîmpul ne dă posibilitatea să determinăm forţa care acţionează asupra unui pol magnetic în fiecare punct al spaţiului. Pentru moment, aceasta este singura justificare a construcţiei noastre îngrijite a

cîmpului. Ştiind acum ce exprimă cîmpul, vom examina cu mult mai mult interes liniile de forţă care corespund curentului. Ele sînt cercuri care înconjură sîrma şi sînt situate în plane perpendiculare pe cel al sîrmei. Caracterul forţei, cum rezultă din figură, ne duce, de asemenea, la concluzia că forţa acţionează perpendicular pe fiecare linie care uneşte sîrma cu polul, căci tangenta la un cerc este întotdeauna perpendiculară pe raza corespunzătoare. Tot ce ştim despre ac
Cîmp, relativitate
46
ţiunea forţelor poate fi rezumat în construcţia cîmpului. Prin urmare, introducem noţiunea de cîmp între cea de curent şi pol magnetic pentru a reprezenta, într-un mod simplu, forţele active.
Fiecare curent este însoţit de un cîmp magnetic, adică i se poate asocia o ^fortă^cara. ajpţianează asupra magnetic situat în vecinătatea sîrmei prin care trece curentul. Vom remarca, în treacăt, că această proprietate ne dă posibilitatea de a construi aparate sensibile care pun în evidenţă existenţa unui curent. O dată ce am învăţat să descifrăm caracterul forţelor magnetice din modelul cîmpului unui curent, pentru a reprezenta
acţiunea forţelor magnetice în fiecare punct al spaţiului, vom desena de fiecare dată cîmpul care înconjură sîrma prin care trece curentul. Primul nostru exemplu este aşa-numitul solenoid. A-cesta este o bobină aşa cum se vede în figură (fig. 46). Scopul nostru este să învăţăm, din experienţă, tot ce se poate, asupra cîmpului magnetic asociat curentului care trece prin solenoid şi să reunim apoi a-ceste cunoştinţe într-o reprezentare prin cîmp. Diagrama (fig. 46) reprezintă rezultatul nostru. Liniile de forţă sînt curbe închise şi înconjură solenoidul într-un mod caracteristic pentru cîmpul magnetic creat de un curent.
Fig.46
Fig. 47
46
Evoluţia fizicii
Cîmpul unui magnet în formă de bară poate fi reprezentat în acelaşi mod ca şi cîmpul unui curent electric. Altă diagramă arată acest cîmp. Liniile de forţă sînt îndreptate de la polul pozitiv către cel negativ (fig. 47). Vectorul-forţă este situat întotdeauna pe tangenta la linia de forţă şi este mai lung în apropierea polilor, fiindcă în aceste puncte densitatea liniilor este cea mai mare. Vectorul-forţă reprezintă acţiunea magnetului asupra unui pol magnetic pozitiv. în cazul acesta „sursa" cîmpului este magnetul şi nu curentul.
Să comparăm acum cu atenţie ultimele două figuri» Prima reprezintă cîmpul magnetic al unui curent care trece printr-un solenoid ; cea de a doua, cîmpul unui magnet în formă de bară. Să facem abstracţie de solenoid şi de bară şi să comparăm numai cîmpurile exterioare lor. Vom constata că ele au exact acelaşi caracter. Şi în primul caz şi în al doilea, liniile de forţă merg de la un capăt la celălalt al solenoidului, respeciv al barei, i Reprezentarea cu ajutorul cîmpului îşi dă primele jroade ! Ar fi fost destul de greu să întrezărim o asemă-'nare mai remarcabilă între curentul care trece printr-un solenoid şi o bară magnetică dacă această asemănare nu ne-ar fi fost revelată de construcţia noastră a cîmpului.
Conceptul de cîmp poate fi supus unei încercări mult mai severe. Vom stabili îndată dacă el reprezintă şi altceva decît o nouă reprezentare a forţelor-car^-ai^i^ Am putea raţioTTa'asfrer: să admitem că, pentru moment, cîmpul caracterizează toate acţiunile determinate în mod univoc de izvoarele lui. Fireşte, aceasta este numai o bănuială. Ea înseamnă, de exemplu că, întgufiâtjîl^soje--' npjdjjiMX^ au acelaşi cîmp, toate acţiunile lor ar trebui să fie şi ele identice. Cu alte cuvinte, doi sole-noizi prin care trece curent electric ar trebui să se comporte ca două bare magnetice ; să se atragă sau să se respingă între ei într-un mod care să depindă, întocmai ca în cazul barelor, numai de poziţia lor relativă. Ar însemna, deasemenea, că un solenoid şi o bară să se atragă sau să se respingă întocmai ca două bare. Pe scurt,, aceasta ar însemna că toate acţiunile unui solenoid străbătut de curent şi ale unei bare magnetice corespunză
Cîmp, relativitate
10&
toare ar fi identice, deoarece singura lor cauză este cîmpul, iar cîmpul are acelaşi caracter în amîndouă cazurile. Experienţa confirmă pe deplin bănuiala noastră î

Cît de greu ne-ar fi fost să descoperim aceste fapte fără conceptul de cîmp ! Expresia forţei care acţionează între un conductor străbătut de curent şi un pol magnetic este foarte complicată ; în cazul a doi solenoizi ar fi trebuit să cercetăm forţele cu care acţionează doi curenţi unul asupra altuia. Cu ajutorul cîmpului sezisăm însă imediat caracterul tuturor acestor acţiuni de îndată ce am stabilit asemănarea dintre cîmpul unui solenoid şi cel al unei bare magnetice.
Avem deci dreptul să privim cîmpul ca reprezentînd ceva mai mult decît am făcut pînă acum. Proprietăţile cîmpului singure apar a fi esenţiale pentru descrierea fenomenelor ; diferenţele dintre surse nu au importanţă. Conceptul de cîmp îşi relevă importanţa prin faptul că eFa condus la noi fapte experimentale. " -—*
Cîmpul a devenit deci o noţiune foarte irţjlă- InitiaL el fusese conceput ca ceva introdus între sursă şi acul magnetic pentru a descrie forţele active. Fusese conceput ca un simplu „agent", prin mijlocirea căruia se exercită toată acţiunea curentului. Dar acum agentul acţionează el însuşi ca interpret, traducînd legile într-un limbaj simplu, clar, lesne de înţeles.
Primul succes al descrierii prin cîmp sugerează că ar fi util să tratăm toate-acţiunile curenţilor, magneţilor şi" sarcinilor în mod indirect, adică cu ajutorul cîmpului ca interpret. Cîmpul trebuie privit ca ceva asociat tot timpul unm_cureîiţ. El există în cazul unui curent, chiar în absenţa unui pol magnetic menit să-i stabilească existenţa. Să încercăm să urmăm în mod consecvent această noua cale.
Cîmpul unui conductor încărcat poate fi introdus în acelaşi mod ca şi cîmpul gravitaţional sau ca cel al unui curent sau magnet. Să luăm cel mai simplu exemplu. Pentru a descrie cîmpul unei sfere încărcate pozitiv trebuie să ne întrebăm ce fel de .forţe acţionează asupra unui' corp de probă încărcat pozitiv, adus în vecinătatea izvorului cîmpului, adică a sferei încărcate. Faptul că folosim*

un corp de probă încărcat pozitiv şi nu unul încărcat negativ este o chestiune numai de convenţie care indică în ce sens trebuie îndreptate săgeţile în lungul liniilor de forţă. Modelul este analog cu cel al cîmpului gravitaţional, datorită asemănării dintre legea lui Coulomb şi cea a lui Newton (fig. 48). Singura diferenţă dintre cele două modele este că săgeţile lor sînt îndreptate în sensuri opuse, în adevăr, două sarcini pozitive se resping, iar două
Fig. 48 Fig. 49
mase se atrag. în schimb, cîmpul unei sfere încărcate ne-1 gativ va fi identic cu cîmpul gravitaţional, întrucît în cazul acesta micul corp de probă încărcat pozitiv va fi atras către izvorul cîmpului (fig. 49).
Dacă cei doi poli electrici şi magnetici sînt în repaus, nu se exercită nici o acţiune intre ei, nici atracţie, nici respingere. Exprimînd acelaşi fapt în limbajul cîmpului putem spune : un cîmp electrostatic nu influenţează un cîmp ma^oeto^iaUe reciproc. Cuvintele „cimp--static" Resemnează ^un cîmp care nu variază înj^m£. Magnetul şi sarcînîle" ar putea râmîne alături pSitru vecie cu condiţia de a nu fi perturbate de nici o forţă exterioară. Cîm-purile electrostatic, magnetostatic şi gravitaţional au caractere diferite. Ele nu se amestecă ; fiecare îşi păstrează individualitatea fără a ţine seama de celelalte.
Să ne întoarcem la sfera electrică care fusese pînă
acum în repaus şi să presupunem că începe să se mişte sub acţiunea unei forţe exterioare oarecare. Sfera încărcată se mişcă. în limbajul cîmpului aceasta spune : cîmpul sarcinii electrice variază în timp. Dar, după cum ştim din experienţa lui Rowland, mişcarea sferei încărcate este echivalentă cu un curent. De altă parte, fiecare curent este însoţit de un cîmp magnetic. Prin urmare, lanţul raţionamentului nostru este :
mişcarea sarcinii -> variaţia unui cîmp electric
Conchidem deci : Vgxiatia^uzaiLd^
curent -> cîmp magnetic asociat
de mişcarea unei sarcini, zsîgjm^ cîmp magnetic. Această concluzie se bazează pe experinţa lui Oerstgd*-^^ Ea con-
ţine şi recunoaşterea faptului că asocierea unui cîmp electric, variabil în timp, cu un cîmp magnetic este esenţială pentru raţionamentele noastre viitoare. 0,
Cîtă vreme o sarcină este în repaus avem numai un ^îj cîmp electrostatic. Dar de îndată ce sarcina începe să se mişte, apare şi un cîmp magnetic. Putem spune mai mult : *

cîmpul magnetic creat de mişcarea sarcinii va fi cu atît \ mai intens cu cît sarcina este mai mare şi cu cît se mişcă mai repede. Aceasta este o consecinţă tot a experienţei lui Rowland. Folosind din nou limbajul cîmpului putem spune : cu cît cîmpul electric variază mai repede cu atît cîmpul magnetic asociat este mai intens.
Am încercat să traducem fapte obişnuite din Jjmha-jutfluidelor, construit în cfficqBdantă cu vechea,.concepţie Mecanicista. în noul limbaj al cîmpului. Vom vedea mai departe, cit de clar, instructiv şi cuprinzător este noul nostru limbaj. * [r^w*).

§ 22. CEI DOI STÎLPI AI TEORIEI CÎMPULUI

„Variaţia unui cimp electric este însoţită de un cîmp magnetic". Să intervertim cuvintele „magnetic" şi „electric" ; ajungem astfel la o nouă afirmaţie : „variaţia unui cîmp magnetic este însoţita de un cîmp electric". Dacă ^ pgţp adevăra^^poSfC decide numai ^pesieaţa, Dar

i£gga formulării acestei probleme ne este sugerată de folosirea limbajului cîmpului.
Acum mai bine de 100 ani, Faraiday a efectuat o experienţă care a condus la celebra descoperire a curenţilor induşi.
Demonstraţia este foarte simplă. Nu avem nevoie decît de un solenoid sau alt circuit, de o bară magnetică şi de unul din multiplele tipuri de aparate care indică existenţa curentului electric. Iată experienţa : o bară magnetică este menţinută ne-
mişcată în apropierea unui solenoid care formează un circuit închis. Prin sîrmă nu trece curent pentru că nu există nici un izvor de curent (fig. 50). Există numai cîmpul magne-
tostatic al barei magne-
tice, care nu variază în timp. Schimbăm brusc poziţia magnetului, fie îndepărtîndu-1, fie apropiindu-1 de solenoid, după preferinţă. în clipa aceasta apare un curent pentru foarte scurt timp şi apoi dispare. Ori de cîte ori schimbăm poziţia magnetului faţă de solenoid apare un curent pe care îl detectăm cu un aparat destul de sensibil. Dar, din -punctul de vedere al teoriei cîmpului, un curent înseamnă existenţa unui cîmp electric care sileşte fluidul electric să curgă prin sîrmă. Curentul, şi prin urmare şi cîmpul electric, dispare cînd magnetul rămîne din nou nemişcat.
Să admitem pentru moment că nu am cunoaşte limbajul cîmpului şi că ar trebui să descriem, calitativ şi cantitativ, rezultatele acestei experienţ^?Î^H^bajpl vechilor noţiuni mecaniciste. Experienţa noastră spline : priii jmş-câr^gnmuî dîpol magnetic, s-a creat o nouă forţă care a pus în mişcare fluidul electric în sîrmă. întrebarea următoare va fi : de cine depinde această forţă ? Ne-ar fi greu să răspundem. Trebuie să cercetăm dependenţa forţei de viteza magnetului, de forma lui şi de forma circuitului. Mai departe, această experienţă, interpretată în vechiul

iu
limbaj, nu ne dă nici o indicaţie dacă curentul ar putea fi produs de mişcarea unui alt circuit străbătut de curent sau numai de mişcarea unei bare magnetice.
Este cu totul altfel dacă întrebuinţăm limbajul cîmpului şi, conform principiului nostru, spunem că acţiunea^

Fig. 51

este determinată de cimp. Se vede dintr-o data că un solenoid străbătut de un curent serveşte tot aşa de bine ca şi o bară magnetică. în fig. 51 sînt reprezentaţi doi sole-noizi : unul mic, prin care curge curent, şi altul mai mare,
în care este indus curentul detectat. Putem deplasa solenoidul cel mic, cum am deplasat şi bara magnetică; se produce un curent indus în solenoidul cel mare. Mai mult, în loc de a deplasa solenoidul mic, vom putea produce sau suprima un cîmp magnetic produ-cînd sau suprimînd curentul, adică închizînd şi deschizînd circu

Fig. 52

itul. încă o dată, noi fapte si^raţe__de teoria cîmpului
sînt confirmate de experienţă.
Să luăm un exemplu mai simplu. Avem o sîrmă închisă care nu este legată cu nici o sursă de curent. Undeva în apropiere este un cîmp magnetic. Nu ne interesează dacă sursa acestui cîmp magnetic este un alt circuit prin care trece un curent electric sau este o bară magnetică.

Figura 52 înfăţişează circuitul închis şi liniile de forţă magnetice. Descrierea calitativă şi cantitativă a fenomenelor de inducţie este foarte simplă în termenii limbajului cîmpului. Cum se vede din figură, o parte din liniile de forţă trec prin suprafaţa limitată de sîrmă. Să considerăm liniile de forţă care înţeapă porţiunea planului mărginită de sîrmă. Cîtă vreme nu variază cîmpul, nu trece curent electric, oricît de mare ar fi intensitatea lui. Dar, de îndată ce numărul liniilor care străbat suprafaţa mărginită ^e sîrmă variază, începe să treacă un curent prin sîrmă. i Curentul este dptprripnat de variaţia numărului de linii ^de forţă care străbat suprafaţa, indiferent de modul in care s-ar produce această variaţie. Ea este sifigtar no-ţiune esenţială pentru descrierea atît calitativă cît şi cantitativă a curentului indus. „Numărul de linii variază" înseamnă că se schimbă densitatea liniilor, deci că variază ■ intensitatea cîmpului.
Punctele esenţiale în raţionamentul nostru sînt : variaţia cîmpului magnetic -* curent indus -f mişcarea sarcinii ->existenţa unui cîmp electric.
Deci : un cîmp magnetic variabil este însoţit de un cîmp electric.
Am găsit astfel, cei doi stîlpi ai teoriei cimpurilor electric şi magnetic. Primul este legătura dintre cîmpul electric variabil şi cîmpul magnetic. El a derivat din experienţa lui Oersted, asupra devierii acului magnetic şî a dus la concluzia că : un cîmp electric variabil este însoţit de un cîmp magnetic.
Cel de al doilea leagă cîmpul magnetic variabil de curentul indus şi a derivat din experienţa lui Faraday. împreună, ei constituie baza unei deso^d^xântitgtiYi^-
Din nou cîmpul electric asociat cîmpului magnetic variabil apare ca ceva reafc Mai sus a trebuit să admitem existenţa cîmpului magnetic al unui curent şLîn__absenţa pol11luj de pynhă. Asemănător trebuie să admitem acum existenţa cîmpului electric chiar dacă lipseşte sîrma cu care se poate constata prezenţa curentului indus.
De fapt, construcţia noastră bazată pe doi stîlpi ar putea fi redusă la o construcţie bazată pe unul singur, anume pe cel derivat din experienţa lui Oersted. Rezulta-
^? oOhv >wte4; .W^. wW>^^ te^b

tul experienţei lui Faraday ar putea fi dedus din cea a lui Oersted cu ajutorul legii conservării energiei. Am adoptat construcţia pe cele două baze numai pentru claritate şi economie.
Vom menţiona încă o consecinţă a descrierii cu ajutorul cîmpului. Fie un circuit prin care trece un curent a cărui sursă este, de exemplu, o baterie voltaică. Să în-trerupem brusc legătura dintre sîrmă şi sursa de curent. Bineînţeles, curentul se întrerupe. Dar în timpul acestei scurte întreruperi are loc un proces complicat, care poate fi deasemenea prevăzut în teoria cîmpului. înainte de întreruperea curentului exista un cîmp magnetic în jurul sîrmei. In momentul întreruperii curentului, el a încetat să mai existe. Aşadar, prin întreruperea curentului, a dispărut un cîmp magnetic. Numărul de linii de forţă care trec prin suprafaţa limitată de sîrmă a variat foarte rapid. Dar o astfel de schimbare rapidă, oricum s-ar producer trebuie să creeze un curent indus. Ceea ce interesează este variaţia cîmpului magnetic care face curentul indus mai intens dacă variaţia este mai mare. Aceagta conse-U r cinţă este o altă piatră de încercare pentru teorie. întreruperea unui curent ar trebui să fie însoţită de apariţia momentană a unui curent indus intens. Experienţa confirmă şi această prevedere. Oricine a întrerupt cîndva un curent a observat că se produce o scînteie. Această scîn-teie pune în evidenţă marea diferenţă de potenţial provocată de variaţia rapidă a cîmpului magnetic.
Acelaşi proces poate fi privit şi dintr-un punct de vedere energetic Un cîmp magneţi?* a dispărut şi s-a produs o scînteie. Dar o scînteie reprezintă energie, prin urmare şi cîmpul magnetic reprezintă energie. Pentru a aplica în mod consecvent noţiunea de cîmp şi limbajul
cîmpului trebuie să privim cîmpul maar^tip ca m ry^oc.
4ş enprpie. Numai astfel sîntem în stare să descriem fenomenele electrice şi magnetice in concordanţă cu legea conservării energiei.
De unde la început fusese numai un model util, cîmpul. „a devenit din ce în ce mai r.eal. El ne-a ajutat să înţelegem fapte vechi şi ne-a condus la altele noi. Atribuind cîmpului o energie, am făcut încă un pas înainte în dez-

voltarea în care noţiunea de cîmp a cîştigat din ce în ce mai mult în importanţă, în vreme ce noţiunea de sub-stgjotă, atît de esenţială pentru punctul de vedere mecanicist, a fost părăsită din ce în ce mai mult.
fcfJhc+S?). § 23. REALITATEA CÎMPULUI
Descrierea cantitativă, matematică, a legilor cîmpului este rezumată în ecuaţiile lui Maxwell. La formularea lor au condus faptele menţionate pînă acum, dar conţinutul acestor ecuaţii este mult mai bogat decît am fost în stare să-1 înfăţişăm. Forma lor simplă ascunde o adîncime pe care o dezvăluie numai un studiu amănunţit.
Formularea acestor ecuaţii este cel mai important eveniment în fizică de la Newton încoace, nu numai din cauza bogăţiei conţinutului lor, dar şi pentru că ele reprezintă prototipul unui nou tip de legi.
Caracteristicile ecuaţiilor lui Maxwell, care se regăsesc în toate celelalte ecuaţii ale fizicii moderne, sînt rezumate într-o singură afirmaţie. Ecuaţiile lui Maxwell sînt legi care exprimă QjfVn±^g ^îvnnillli
De ce ecuaţiile lui Maxwell se deosebesc ca formă şi caracter de ecuaţiile mecanicii clasice ? Ce sens are afirmaţia că aceste ecuaţii descriu structura cîmpului ? Cum este posibil ca din rezultatele experimentale ale lui ■Oersted şi Faraday să formulăm un nou tip de lege, care se dovedeşte atît de important pentru dezvoltarea ulterioară a fizicii ?
Am văzut din experienţa lui Oersted cum liniile de forţă ale cîmpului magnetic se închid în jurul unui cîmp .electric variabil. Am văzut din experienţa lui Faraday cum liniile de forţă ale cîmpului electric se închid în jurul unui cîmp magnetic variabil. Pentru a schiţa unele trăsături caracteristice ale teoriei lui Maxwell să ne concentrăm toată atenţia asupra uneia din cele două experienţe, să zicem asupra experienţei lui Faraday.
Reproducem desenul care reprezintă inducerea unui curent electric de către un »cîmp magnetic variabil (fig. 53). Ştim că dacă numărul liniilor de forţă care trec prin suprafaţa mărginită de sîrmă variază, atunci apare un curent indus. Prin urmare, cu

Fig. 53
rentul va apare fie dacă variază cimpul magnetic, fie dacă circuitul este deformat sau deplasat ; cu alte cuvinte clacă variază numărul liniilor magnetice care trec prin suprafaţă, indiferent cum se produce această variaţie. Pentru a ţine seamă de toate aceste posibilităţi, pentru a analiza influenţa fiecăreia în parte, ar fi necesară o teorie foarte complicată. Dar nu putem oare simplifica problema ? Să încercăm să eliminăm din consideraţiile noastre tot ce priveşte forma circuitului, lungimea lui, aria mărginită de sîrmă. Să ne imaginăm că circuitul din ultima noastră figură devine din ce în ce mai mic, strîn-gîndu-se treptat către un circuit foarte mic, care înconjură un anumit punct al spaţiului. Atunci, tot ceea ce priveşte forma şi mărimea lui nu mai contează. în cazul limită, în care curba închisă se reduce la un punct, mărimea şi forma circuitului se elimină în mod automat după consideraţiile noastre şi obţinem astfel le&y^^Lis-u-e^e variaţiile cîmpului electric şi magnetic într-un punct arbitrar al spaţiului, într-un moment oarecare.
Acesta este unul dintre principalii paşi care conduc la ecuaţiile lui Maxwell. El reprezintă tot o experienţă idealizată prin care repetăm în imaginaţie^ experienţa lui Faraday cu un circuit care tinde către un punct.
De fapt, ar trebui să-1 numim mai curind o jumătate de pas, decît un pas întreg. Pînă acum ne-am concentrat atenţia asupra experienţei lui Faraday. Trebuie insă ca să tratăm cu aceeaşi atenţie şi în acelaşi fel celălalt stîlp al teoriei cîmpului bazat pe experienţa lui Oersted. în această experienţă liniile de forţă magnetice se închid în jurul curentului. O a doua jumătate de pas o constituie strîngerea liniilor de forţă magnetice circulare

într-un punct, iar întregul pas reprezintă o corelaţie între variaţiile cîmpurilor electric şi magnetic în jurul unui punct arbitrar al spaţiului, într-un moment oarecare.
Este însă necesar un al doilea pas esenţial. Potrivit, experienţei lui Faraday este nevoie de o sîrmă pentru a stabili existenţa cîmpului electric, după cum în experienţa lui Oersted

este nevoie de un pol magnetic sau de un ac magnetic pentru a constata existenţa cîmpului magnetic. Dar noile idei teoretice ale lui Maxwell depăşesc aceste fapte experimentale. în teoria lui Maxwell, cîmpul electric şi magnetic, sau pe scurt cîmpul electromagnetic, este ceva ^al- Cîmpul electric este produs de un cîmp magf^îT^vS-iabil absolut independent de faptul dacă există sau nu o sîrmă care să-i stabilească existenţa ; de asemenea, un cîmp magnetic este produs de un cîmp electric variabil, indiferent dacă există sau nu un pol magnetic care să-i indice existenţa.

Doi paşi esenţiali conduc la ecuaţiile lui Maxwell. Primul : din considerarea experienţelor lui Oersted şi Rowland, liniile circulare ale cîmpului magnetic, care se închid în jurul cîmpului electric variabil, trebuie făcute să tindă către un punct ; din considerarea experienţei lui F a-raday, liniile circulare ale cîmpului electric, care se închid în jurul cîmpului magnetic variabil, trebuie şi ele făcute sa tindă către un punct. Al doilea pas este conceperea cîmpului ca ceva real ; cîmpul electromagnetic, oclată creat există, acţionISza şi variază după legile lui Maxwell.

Ecuaţiile lui Maxwell descriu structura cîmpului electromagnetic. Scena acestor legi este întregul spaţiu şi nu numai punctele în care există sarcină sau materie, ca în cazul legilor mecanice.

Ne amintim care era situaţia în mecanică. Cunoscînd poziţia şi viteza unei particule într-un singur moment precum şi forţele active se putea prevede întreaga traiectorie ulterioară a particulei. în teoria lui Maxwell, dacă ştim cîmpul într-un singur moment, putem deduce din ecuaţiile teoriei, cum va varia cîmpul în spaţiu şi în timp. De asemenea, ecuaţiile lui Maxwell ne dau posibilitatea să reconstituim istoria cîmpului, după cum ecuaţiile me

canicii ne dădeau posibilitatea să reconstituim istoria unei particule materiale.

Există, totuşi, o deosebire esenţială între legile mecanicii şi legile lui Maxwell. Compararea legilor gravitaţiei ale lui Newton cu legile cîmpului ale lui Maxwell va scoate în evidenţă o serie de fapte caracteristice a-cestor ecuaţii.

Cu ajutorul legilor lui Newton putem deduce mişcarea Pămîntului din forţa care acţionează intre Soare şi Pămînt. Aceste legi leagă mişcarea Pămîntului cu acţiunea îndepărtatului Soare. Pământul şi Soarele, deşi atît de departe unul de altul, sînt ambii actori în jocul forţelor.

In teoria lui Maxwell nu există actori materiali. Ecuaţiile matematice ale acestei teorii exprimă legile care guvernează cîmpul electromagnetic. Ele nu leagă, ca în legile lui Newton, două evenimente separate printr-o distanţă atît de mare ; ele nu leagă ceea ce se întîmplă aici cu condiţiile de acolo. Cîmpul de aici şi de acum depinde de cîmpul din imediata vecinătate şi dintr-un moment imediat anterior. Ecuaţiile ne permit să pecizăm ce se va întîmplă puţin mai încolo şi puţin mai tîrziu, dacă ştim ceea ce se întîmplă aici şi acum. Ele ne permit să extindem cunoaşterea cîmpului, prin paşi mici. Putem deduce ceea ce se întîmplă aici din ceea ce s-a întîmplat departe de aici însumînd aceşti paşi foarte mici. în teoria lui Newton, dimpotrivă, sînt permişi numai paşi mari care leagă evenimente îndepărtate. Concluziile experienţelor lui Oersted şi Faraday pot fi redobîndite din teoria lui Maxwell, dar numai prin însumarea paşilor mici, guvernaţi fiecare în parte de ecuaţiile lui Maxwell.

Un studiu matematic mai adîncit al ecuaţiilor lui Maxwell arată că se pot trage concluzii noi şi cu adevărat neaşteptate şi că întreaga teorie poate fi supusă unei verificări la un nivel mai înalt, deoarece consecinţele teoretice au acum un caracter cantitativ şi decurg dintr-un lanţ întreg de argumente logice.

Să ne imaginăm din nou o experienţă idealizată. O mică sferă încărcată electric este silită, de către o acţiune exterioară oarecare, să oscileze rapid, ritmic, ca un

pendul. Cu cunoştinţele pe care le avem despre variaţiile cîmpului, cum vom descrie în limbajul cîmpului ceea ce se petrece local în cazul acesta ? •

Oscilaţia sarcinii produce un cîmp electric variabil. El este însoţit întotdeauna de un cîmp magnetic variabil. Dacă în apropiere se află o sîrmă care formează un circuit închis, atunci cîmpul magnetic va fi însoţit, la rîndul lui, de un curent electric în circuit. Toate acestea nu sînt decît repetarea unor fapte cunoscute, dar studiul ecuaţiilor lui Maxwell ne

permite să pătrundem mai adînc în problema sarcinii electrice oscilante. Printr-un raţionament matematic, din ecuaţiile lui Maxwell putem să stabilim caracterul cîmpului din jurul unei sarcini care oscilează, structura lui aproape şi departe de sursă precum şi variaţia lui în timp. Rezultatul acestui raţionament este unda electromagnetică. Sarcina oare oscilează radiază energie, care străbate spaţiul cu o viteză bine definită ; dar propagarea energiei şi variaţia unei stări sînt caracteristice tuturor fenomenelor ondulatorii.
Ne-am ocupat pînă acum cu diferite tipuri de unde. Am avut de a face cu unda longitudinală produsă de sfera care pulsa, în care caz ceea ce se propaga în mediu erau variaţiile densităţii. Am avut mediul gelatinoid in care se propaga unda transversală. In cazul acesta, înainta in mediu o deformare a gelatinei, produsă de rotaţia sferei. De ce natură sînt variaţiile care se răspîndesc în cazul unei unde electromagnetice ? Ele sînt tocmai variaţiile cîmpului electromagnetic ! Orice variaţie a unui cîmp electric produce un cîmp magnetic, orice variaţie a acestui cîmp magnetic produce un cîmp electric şi aşa mai departe. Deoarece cîmpul reprezintă energie, toate aceste variaţii care se răspîndesc în spaţiu cu o viteză anumită constituie o undă. După cum rezultă din teorie, liniile de forţă magnetice şi electrice sint situate întotdeauna în plane perpendiculare pe direcţia de propagare. Unda generată este deci transversală. Aspectele iniţiale ale imaginii timpului, furnizată de experienţele lui Oersted şi Faraday, subsistă întotdeauna dar constatăm că această imagine are o semnificaţie mai adîncă.
Unda electromagnetică se propagă în vid ; aceasta

rezultă din teorie. Dacă sarcina care oscilează încetează brusc să se mişte, atunci cîmpul ei devine electrostatic. Dar seria de unde create de oscilaţie continuă să se răspîndească. Undele au o existenţă independentă şi istoria variaţiilor lor poate fi urmărită întocmai ca a oricărui obiect material.
Ne dăm seama că imaginea undei electromagnetice care se propagă cu o viteză anumită în spaţiu şi care variază în timp, rezultă din ecuaţiile lui Maxwell, pentru faptul că ele descriu structura cîmpului electromagnetic în fiecare punct din spaţiu şi in fiecare moment al timpului.
Mai este o chestiune importantă. Cu ce viteză se propagă o undă electromagnetică în vid ? Teoria, cu ajutorul unor date deduse din experienţe simple care nu au nimic de a face cu propagarea efectivă a undelor, dă un răspuns clar la această întrebare : viteza unei unde electromagnetice este egală cu viteza luminii.
Experienţele lui Oersted şi Faraday alcătuiesc baza legilor lui Maxwell. Toate rezultatele noastre de pînă acum au fost dobîndite printr-un studiu atent al acestor legi, exprimate în limbajul cîmpului. Descoperirea teoretică a undei electromagnetice care se propagă cu viteza luminii este una din cele mai mari cuceriri din istoria ştiinţei.
Experienţa a confirmat prezicerile teoriei. în urmă cu 50 ani Hertz a dovedit, pentru prima oară, existenţa undelor electromagnetice şi a confirmat experimental că viteza lor este egală cu viteza luminii. Astăzi, milioane de oameni verifică faptul că undele electromagnetice pot fi emise şi recepţionate. Aparatul lor este mult mai complicat decît cel folosit de Hertz şi descoperă prezenţa undelor la mii de kilometri de izvorul lor, nu numai la cîţiva metri.
§ 24. CÎMPUL ŞI ETERUL
Unda electromagnetică este o undă transversală care se propagă cu viteza luminii în vid. Egalitatea celor două viteze sugerează o legătură strînsă între fenomenele optice şi cele electromagnetice.

Cind am avut de ales între teoria corpusculară şi cea ondulatorie, am optat pentru teoria ondulatorie. Cei mai puternic dintre argumentele care ne-au influenţat hotă-rirea a fost difracţia luminii. Nu contrazicem însă nici una din explicaţiile date fenomenelor optice admiţînd că şi unda de lumină este o undă electromagnetică. Dimpotrivă, putem deduce fapte suplementare. Dacă este cu adevărat aşa, atunci trebuie să existe o legătură oarecare între proprietăţile optice şi cele electrice ale materiei, legătură care poate fi dedusă din teorie. Faptul că se pot trage efectiv astfel de concluzii şi că ele rezistă experienţei este un argument esenţial în favoarea teoriei electromagnetice a luminii.

Acest important rezultat este datorit teoriei cîmpului. Două ramuri ale ştiinţei, în aparenţă fără legătură, sînt unite în aceeaşi teorie. Aceleaşi ecuaţii ale lui Maxwell jâescriu atît inducţia electromagnetică cît şi refracţia optică. Or, dacă obiectivul nostru este să descriem cu ajutorul unei singure teorii tot ce s-a întimplat sau se va întîmpla cîndva, atunci fuzionarea opticii cu electricitatea constituie fără îndoială un mare pas înainte. Din punctul de vedere fizic, singura deosebire dintre o undă electromagnetică obişnuită şi o undă de lumină este lungimea de undă : ea este foarte mică pentru undele de lumină înregistrate de ochiul omenesc şi este mare pentru undele electromagnetice obişnuite care sînt detectate de un receptor de radio.
Vechea concepţie mecanicistă încercase să Reducă toate evenimentele din natură la forţe care acţionează între particulele materiale. Pe această concepţie mecanicistă a fost clădită prima teorie, naivă, a fluidelor electrice. Pentru fizicianul de la începutul secolului al XlX-dea cîmpul era inexistent. Pentru el numai substanţele şi schimbările lor erau reale. El se străduia să descrie acţiunea a două sarcini electrice numai cu ajutorul unor noţiuni care se raportau direct la cele două sarcini.
La inceput conceptul de cîmp nu era mai mult decît un mijloc de a înlesni înţelegerea fenomenelor din punctul de vedere mecanic.
Cîmp, relativitate
53
în noul limbaj al cîmpului, descrierea cîmpului dintre două sarcini, şi nu sarcinile înseşi, este esenţială pentru înţelegerea acţiunii lor. Recunoaşterea acestor noi concepte a crescut în mod continuu, în timp ce substanţa a fost lăsată în umbră de către conceptul de cîmp. S-a înţeles că s-a întîmplat ceva de o mare importanţă în fizică. A fost creată o nouă realitate, un nou concept pentru care nu era loc în descrierea mecanică. Cu încetul şi prin luptă, conceptul de cîmp şi-a stabilit singur un loc conducător în fizică şi a devenit unul dintre conceptele de bază ale fizicii. Pentru fizicianul modern, cîmpul elec-tromagnetic este ceva tot atît de real ca şi scaunul pe care sade.
însă ar fi greşit să credem că noua concepţie a cîmpului a eliberat ştiinţa de erorile vechii teorii a fluidelor electrice sau că noua teorie anulează realizările celei vechi. O nouă teorie pune în lumină atît calităţile cît şi limitele vechii teorii şi ne permite să redobîndim vechile noţiuni dintr-un alt punct de vedere (mai înalt). Acest lucru este valabil nu numai în cazul teoriei fluidelor electrice şi a cîmpului ci şi pentru toate prefacerile teoriilor fizice, oricît de revoluţionare ar părea ele. De exemplu, în cazul nostru, vom regăsi în teoria lui Maxwell conceptul de sarcină electrică, chiar dacă sarcina este concepută numai pa izvor al cîmpului electric. Legea lui Coulomb continuă de asemenea să fie valabilă şi este conţinută în ecuaţiile lui Maxwell, din care poate fi dedusă ca una din numeroasele lor consecinţe. Putem aplica şi de aici înainte teoria veche ori de cîte ori cercetăm fapte care intră în domeniul ei de valabilitate. Dar putem tot atît de bine să folosim noua teorie, dat fiind că toate faptele cunoscute sînt conţinute în sfera ei de valabilitate.
Folosind o comparaţie, putem spune că crearea unei noi teorii nu este asemănătoare cu distrugerea unui şopron vechi şi ridicarea în locul lui a unui zgîrie nori. Ea se aseamănă mai degrabă cu o ascensiune pe un munte, în cursul căreia perspectiva se schimbă şi se lărgeşte necontenit, dîndu-ne prilejul să descoperim legături neaşteptate între punctul nostru de plecare şi împrejurimile lui
53
Evoluţia fizicii
bogate. Dar locul de unde am plecat nu va înceta să existe şi se va zări încă de pe culme ; el va părea însă mult mai mic, reprezentînd doar o părticică neînsemnată din larga privelişte pe care ne-am cucerit-o învingînd obstacolele ivite de-a lungul urcuşului nostru plin de peripeţii.
în realitate a trecut mult timp pînă cînd s-a reuşit să se recunoască tot conţinutul teoriei lui Maxwell. La mceput, cîmpul a fost considerat ca ceva care urma să fie-interpretat ulterior din punctul de vedere mecanicist cu a-jutorul eterului. Cu timpul s-a înţeles că programul â-cesta nu poate fi înfăptuit pină la capăt ; realizările teoriei cîmpului deveniseră prea evidente şi importante pentru a se putea renunţa la ele în favoarea unei dogme mecaniciste. De altă parte, problema imaginării unui model mecanic al eterului părea să prezinte din ce în ce mai puţin interes, iar rezultatele, dat fiind caracterul artifical şi forţat al presupunerilor să devină din ce în ce mai descurajatoare.

Singura ieşire pare a fi să admitem pur şi simplu că spaţiul are proprietatea fizică de a transmite unde electromagnetice, şi a nu ne preocupa prea mult de semnificaţia acestei afirmaţii. Putem folosi şi mai departe cu-vîntul „eter", dar numai pentru a exprima o proprietate fizică a spaţiului. Termenul „eter" şi-a schimbat de mai multe ori înţelesul în cursul dezvoltării ştiinţei. în etapa de faţă el a încetat să reprezinte un mediu construit din particule. Povestea lui nu este însă nicidecum sfîrşită 'r ea este continuată de teoria relativităţii.

§ 25. SISTEM DE REFERINŢA

Ajunşi la această treaptă a povestirii noastre trebuie să ne întoarcem la punctul ei de plecare, la legea inerţiei, a lui Galileu. Citǎm din nou :

„orice corp îşi păstrează starea sa de repaus sau de mişcare uniformă în linie dreaptă dacă nu este constrîns de forţele care-l solicită să-şi schimbe starea".

Cine a înţeles o dată ideea inerţiei nu vede ce s-ar mai putea spune despre ea. Cu toate acestea, deşi această problemă a fost discutată în mod amănunţit, ea este departe de a fi epuizată.

Să ne imaginăm un om de ştiinţă serios care este convins că legea inerţiei poate fi dovedită sau infirmată pe bază de experienţe reale. El rostogoleşte mici sfere pe o masă orizontală încercînd să elimine, pe cît se poate, frecarea. El observă că mişcarea devine cu atît mai uniformă cu cît masa şi sferele sînt mai netede. Tocmai cînd este pe cale să enunţe principiul inerţiei, cineva îi face c farsă pe neaşteptate. Fizicianul nostru lucrează într-o cameră fără ferestre şi nu are nici un fel de comunicaţie cu lumea de afară. Glumeţul nostru montează un mecanism care-i dă posibilitatea să pună toată camera în rotaţie rapidă în jurul unei axe trecînd prin centrul ei. De îndată ce începe rotaţia, fizicianul face constatări noi şi neaşteptate. Sfera care pînă atunci se mişca uniform tinde să se îndepărteze cît mai mult de centru şi să se apropie cît se poate de mult de pereţii damerei î Asupra lui însuşi simte o forţă care-1 împinge spre perete. Ea îi provoacă senzaţia pe care ar avea-o dacă s-ar afla într-un tren sau automobil care ia o turnantă bruscă sau dacă s-ar d^ în căluşei. Toate rezultatele lui anterioare se spulberă. Fizicianul nostru se găseşte în situaţia de a părăsi o dată cu legea inerţiei toate legile din mecanică. Legea inerţiei fusese doar punctul lui de plecare. O dată ce a-cesta s-a schimbat, se schimbă implicit şi concluziile sale. Un observator sortit să-şi petreacă toată viaţa în camera care se roteşte şi să-şi facă experienţele în ea, ar ajunge la legi ale mecanicii diferite de ale noastre. însă, dacă el păşeşte pragul camerei înarmat cu o cunoaştere perfectă a principiilor fizicii şi ferm convins de exactitatea lor, el nu poate explica prăbuşirea aparentă a mecanicii decît admiţînd că încăperea se roteşte. Cu ajutorul unor experienţe mecanice el ar putea chiar să precizeze felul rotaţiei.

De ce ne preocupăm atît de mult de observatorul din camera care se roteşte ? Pur şi simplu pentru că noi pe Pămînt sîntem, oarecum, în aceeaşi situaţie ca el. încă

de la Copernic, ştim că Pămîntul se roteşte în jurul axei sale precum şi în jurul Soarelui. Este drept că nici măcar această idee simplă, atît de limpede pentru oricine, nu a fost cruţată de progresul ştiinţei. Dar să trecem peste aceasta acceptînd, pentru moment, punctul de vedere al lui Copernic. Prin urmare, dacă observatorul nostru care se roteşte nu poate confirma legile mecanicii, noi pe Pămînt vom fi de asemenea incapabili să facem acest lucru. Dar rotaţia Pămîntului este relativ lentă, astfel că efectul nu este prea accentuat. Există totuşi multe experienţe care pun in evidenţă o mică abatere de la legile mecanicii şi concordanţa lor poate fi privită ca o dovadă a rotaţiei Pămîntului.

Din păcate, nu ne putem instala undeva între Soare şi Pămînt pentru a dovedi că acolo legea inerţiei este perfect valabilă şi pentru a putea „vedea cu ochii" că Pămîntul se roteşte. Putem face aceasta numai în imaginaţie. Toate experienţele noastre trebuie să fie executate pe Pămînt unde sîntem constrînşi să trăim. Faptul acesta este exprimat deseori sub o formă mai ştiinţifică : Pă-mîntul este sistemul nostru de coordonate.

Pentru a arăta mai limpede semnificaţia acestor cuvinte, să luăm un exemplu simplu. Putem să prezicem poziţia, în fiecare moment, a unei pietre aruncate dintr-un turn şi să confirmăm prezicerea noastră prin observaţie. Aşezînd de-a lungul turnului o riglă, putem predice cu ce diviziune a ei va coincide, în fiecare moment, corpul care cade. Bine înţeles

turnul şi gradaţia nu tre-bue făcute din cauciuc sau alt material susceptibil să sufere schimbări în timpul experienţei. în principiu, tot ce ne trebuie efectiv pentru experienţă se rezumă la gradaţia invariabilă, solidară cu Pămîntul şi la un ceasornic bun. Dacă le avem, putem face abstracţie nu numai de arhitectura turnului ci chiar şi de prezenţa lui. Presupunerile acestea sînt toate banale şi, de obicei, nici nu se specifică în descrierea unor astfel de experienţe. Această analiză arată cîte presupuneri tacite conţine fiecare din afirmaţiile noastre î în cazul nostru, am presupus existenţa unei bare rigide şi a unui ceasornic ideal, fără de care ar fi imposibil să verificăm legea lui Galileu a că

derii corpurilor. Cu acest utilaj simplu dar fundamental, o riglă şi un ceasornic, putem confirma această lege mecanică cu un anumit grad de precizie. Executată cu îngrijire, această experienţă scoate în evidenţă discordanţa dintre teorie şi experienţă, datorită rotaţiei Pămîntului sau, cu alte cuvinte, faptul că legile mecanicii, aşa cum au fost ele formulate mai sus, nu sînt valabile în mod riguros într-un sistem de coordonate solidar cu Pămîntul.

In toate experienţele mecanice, oricare ar fi tipul lor, trebuie să determinăm poziţia unor puncte materiale la un moment dat întocmai ca în experienţa de mai sus cu corpul în cădere. Dar poziţia trebuie întotdeauna descrisă faţă de ceva, de exemplu în cazul anterior faţă de turn sau de gradaţie. Pentru a putea determina poziţia corpurilor trebuie să dispunem de un sistem de referinţă, un reper mecanic. De exemplu, cînd indicăm poziţia obiectelor sau a oamenilor dintr-un oraş, sistemul de referinţa îl constituie străzile şi bulevardele oraşului. Pînă acum, cînd am enunţat legile mecanicii, nu ne-am preocupat de specificarea sistemului de referinţă, deoarece faptul că trăim pe Pămînt ne permite să fixăm fără nici o dificultate, în oricare caz particular, un sistem de referinţă solidar cu Pămîntul. Acest sistem, la care raportăm toate observaţiile noastre, alcătuit din corpuri rigide invariabile, se numeşte sistem de coordonate. Deoarece termenul acesta îl vom folosi foarte des vom scrie pescurtat S.C.

Toate afirmaţiile noastre fizice de pînă acum păcătuiesc prin aceeaşi lacună : nu am ţinut seama de faptul că orice observaţie trebuie raportată la un anumit S.C. în loc să descriem structura acestui S.C. noi i-am ignorat existenţa. De exemplu, cind am scris „un corp se mişcă uniform., ar fi trebuit de fapt să scriem : „un corp se mişcă uniform faţă de un S.C. determinat". Experienţa noastră cu camera ce se roteşte ne-a învăţat că rezultatele experienţelor mecanice pot depinde de S.C.-ul ales.

Dacă două S.C.-uri se rotesc unul faţă de altul atunci legile mecanicii nu pot fi valabile în amîndouă sistemele. De exemplu, dacă cele două sisteme de coordonate sini re-prezentate de două bazine de înot, atunci dacă în unul din ele suprafaţa apei este orizontală, în cel de al doilea

ea are forma concavă, familiară de la amestecarea cafelei cu linguriţa.

Formulînd principalele legi ale mecanicii am omis un punct important. Nu am precizat pentru care S.C. sînt ele valabile. Din această cauză, întreaga mecanică clasică este suspendată în aer dat fiind că nu ştim la ce sistem de coordonate trebuie s-o raportăm. Să trecem totuşi pentru un moment peste această dificultate. Vom face presupunerea puţin incorectă că legile mecanicii clasice sînt valabile in fiecare S.C. legat solidar cu Pămîntul. Facem aceasta pentru a fixa S.C.-ul şi pentru a da un caracter precis afirmaţiilor noastre. Să acceptăm deci, pentru moment, afirmaţia noastră că Pămîntul este un sistem de referinţă adecuat, deşi ea nu este absolut corectă.

Admitem deci că există un S.C. pentru care legile mecanicii sînt valabile. Este însă acesta singurul ? Să presupunem că am adoptat drept S.C. un tren, un vapor sau un aeroplan care se mişcă faţă de Pămînt. Vor fi valabile legile mecanicii pentru aceste noi S.C.-uri ? Noi ştim bine că ele nu sînt valabile întotdeauna ; de exemplu, în cazul unui tren la curbă, al unui vapor zgîlţîit de furtună, al unui avion care virează în aer. Să începem cu un exemplu simplu. Un S.C. se mişcă uniform faţă de S.C.-ul nostru „bun", pentru a denumi astfel un sistem în care legile mecanicii sînt valabile, de exemplu un tren ideal sau un vapor care pluteşte încîntător de lin, în linie dreaptă şi cu viteză invariabilă. Ştim din experienţa de toate zilele că amîndouă sistemele vor fi „bune", că experienţele fizice efectuate în trenul sau pe vaporul care se mişcă uniform vor da exact acelaşi rezultat ca

şi pe Pămînt. Dar dacă trenul se opreşte sau este accelerat brusc sau dacă marea este agitată se petrec lucruri ciudate. în tren, bagajele cad din plasa port-bagaj ; pe vapor scaunele şi mesele se răstoarnă, iar pasagerii capătă rău de mare. Din punctul de vedere fizic, aceasta nu înseamnă nimic altceva decît că legile mecanicii nu pot fi aplicate acestor S.C.-uri că ele sînt „rele".
Acest rezultat poate fi exprimat de (aşa-nuinitul) principiul relativităţii al lui Galileu : dacă legile mecanicii

sint valabile într-un S.C, ele sînt valabile în oricare alt S.C. care se mişcă uniform faţă de primul.
Dacă avem două S.C.-uri care nu se mişcă uniform unul faţă de altul, atunci legile mecanicii nu pot fi valabile in amîndouă. Sistemele de coordonate „bune", adică acelea pentru care legile mecanicii sînt valabile, se numesc sisteme inerţiale. Problema dacă există în fond sisteme inerţiale nu este încă tranşată. Dar dacă există un singur asemenea sistem, atunci există, implicit, o infinitate de asemenea sisteme : fiecare sistem de coordonate care se mişcă uniform faţă de un S.C. inerţial este de asemenea un S.C. inerţial.
Să considerăm cazul a două S.C.-uri care pornesc dintr-o poziţie cunoscută şi se mişcă uniform unul faţă de altul, cu viteză cunoscută. Cine preferă imaginile concrete nu are decît să-şi reprezinte un vapor sau un tren care se mişcă faţă de Pămînt. Legile mecanicii pot fi confirmate experimental cu acelaşi grad de precizie pe Pămînt, într-un tren sau pe un vapor care se mişcă uniform. Lucrurile se complică însă dacă observatorii din cele două sisteme încep să discute observarea aceluiaşi eveniment, fiecare din punctul de vedere al sistemului său de coordonate ; fiecare încearcă să traducă observaţiile celuilalt în limbajul său, propriu. Să luăm tot un exemplu simplu : una şi aceeaşi mişcare a unei particule este observată din două S.C.-uri : de pe Pămînt şi dintr-un tren în mişcare uniformă. Ele sînt amîndouă inerţiale. Se pune acum problema : admiţînd că vitezele relative şi poziţiile la un moment dat ale celor două sisteme ne sînt cunoscute, este oare de ajuns sa ştim ce se observă într-un S.C. pentru a deduce ce se observă în celălalt ? Este esenţial pentru descrierea evenimentelor să ştim cum să trecem de la up S.C. la altul, dat fiind că ele sînt echivalente şi deopotrivă de capabile să descrie evenimentele din natură. Se constată că este efectiv de ajuns să cunoaştem rezultară le obţinute de un observator într-unui din cele două S.C-uri pentru a le cunoaşte pe cele obţinute de un observator in celălalt S.C.
Să tratăm problema mai abstract : fără vapor sau tren. Pentru a simplifica lucrurile ne vom referi numai la

mişcări în linie dreaptă. Avem deci o bară gradată, rigidă şi un ceasornic bun, căci în cazul simplu al mişcării rectilinii bara rigidă reprezintă un S. C, ca, de exemplu, gradaţia de pe turnul din experienţa lui Galileu. Este totdeauna mai simplu şi mai indicat să ne reprezentăm un sistem de coordonate ca o bară rigidă, în cazul unei mişcări rectilinii, sau ca un grilaj rigid construit din bare paralele şi perpendiculare, în cazul unei mişcări oarecari în spaţiu, şi să facem abstracţie de turnuri, ziduri, străzi şi alte obiecte asemănătoare. Prin urmare, în cazul cel
Fig. 54
mai simplu, cele două S.C.-uri vor fi reprezentate de două bare rigide ; le figurăm una sub alta şi le numim S. C.-ul „de sus" şi S.C.-ul „de jos". Presupunem că cele două S.C.-uri se mişcă unul faţă de altul cu o anumită viteză, astfel că unul lunecă în lungul celuilalt. Este bine să presupunem că amîndouă barele sint infinit de lungi şi că au repere iniţiale dar n-au repere finale. Un singur ceasornic este suficient pentru cele două S.C.-uri pentru că timpul se scurge la fel în amîndouă. în momentul cînd începem observaţiile, reperele iniţiale ale celor două bare coincid. în acest moment poziţia unui punct material este caracterizată în amîndouă S.C.-urile prin acelaşi număr. Punctul material coincide cu o diviziune a gradaţiei de pe bară ; rezultă, astfel, un număr care determină poziţia punctului material. Dar dacă barele se mişcă (uniform) una faţă fcle alta — după un anumit timp, să zicem după o secundă — numerele ce corespund poziţiilor lor vor fi diferite. Să considerăm un punct material în repaus pe bara superioară. Numărul care determină

poziţia lui în sistemul de coordonate superior nu variază în timp (fig. 54). Numărul corespunzător pentru bara de jos va varia insă. In loc de : „numărul ce corespunde poziţiei punctului" vom

spune prescurtat : coordonata punctului. După această precizare, vom găsi corectă şi foarte simplă următoarea propoziţie, în aparenţă încilcită, al cărei conţinut este reprezentat în figură : coordonata unui punct în S.C.-ul de jos este egală cu coordonata lui în S.C.-ul de sus plus coordonata originii S.C.-ului de sus faţă de S.C.-ul de jos. Faptul important este că putem oricînd calcula poziţia unei particule într-un S.C. dacă ştim poziţia ei în altul, în acest scop trebuie să cunoaştem în fiecare moment, poziţia relativă a celor două sisteme de coordonate de
% Fig. 55
care este vorba. Deşi toate acestea sună savant, în realitate ele sînt foarte simple şi aproape că n-ar merita sâ fie discutate în amănunt, dacă analiza aceasta nu ne-ar fi de folos mai tirziu.
Nu este de prisos ca să arătăm deosebirea dintre determinarea poziţiei unui punct şi determinarea momentului unui eveniment. Fiecare observator are bara lui proprie care formează S.C.-ul lui, însă nu există decît un singur ceasornic pentru toţi. Timpul este ceva „absolut" care curge în acelaşi fel pentru toţi observatorii din toate S.C.-urile.
încă un exemplu. Un om păşeşte cu o viteză de trei mile*) pe oră pe puntea unui vapor mare. Aceasta este viteza lui faţă de vapor sau, altfel exprimat, faţă de S.C.-ul solidar cu vaporul. Dacă viteza vaporului este de 30 mile pe oră faţă de ţărm şi dacă vitezele uniforme : a omului şi a vaporului au aceeaşi direcţie, atunci viteza omului va fi de 33 mile pe oră faţă de un observator de pe ţărm sau de 3 mile pe oră faţă de vapor. Putem formula acest fapt mai abstract : viteza unui punct material
1 O milă marină reprezintă, aproximativ, 1852 m, iar una terestră 1610 m.

faţă de S.C.-ul de jos este egală cu viteza lui faţă de S.C.-ul de sus plus sau minus viteza S.C.-ului de sus faţă de S.C.-ul de jos, după cum, vitezele au acelaşi sens sau sensuri opuse (fig. 55). Putem deci să transformăm întotdeauna nu numai poziţii ci şi viteze dintr-un S.C. in altul, dacă ştim viteza relativă a celor două S.C.-uri. Poziţiile (sau coordonatele) şi vitezele constituie exemple de mărimi care sînt diferite în S.C.-uri diferite, şi care sînt legate intre ele prin anumite legi de transformare, în cazul de faţă, foarte simple.
Fig. 56
Există însă cantităţi care sînt identice in cele două S.C.-uri şi pentru care nu sînt necesare legi de transformare. Să luăm drept exemplu nu un singur punct ci doua puncte fixe pe bara de sus şi să considerăm distanţa dintre ele (fig. 56). Această distanţă este diferenţa dintre coordonatele celor două puncte. Pentru a găsi poziţiile a două puncte faţă de două S.C.-uri diferite trebuie să folosim legi de transformare. Construind însă diferenţa poziţiilor celor două puncte, contribuţiile datorite trecerii de la un sistem la altul se compensează şi se elimină, cum se vede în figură ; căci, în total, în cursul operaţiei de transformare a distanţei celor două puncte trebuie pe de o parte să adunăm, pe de altă parte să scădem distanţa dintre originile celor două S.C.-uri. In concluzie, distanţa a două puncte este invariantă, adică independentă de alegerea sistemului de axe de coordonate.
Un alt exemplu de mărime care nu depinde de S.C. este variaţia vitezei, o noţiune familiară nouă din mecanică. In adevăr, dacă se observă în două S.C.-uri un punct material care se mişcă pe o dreaptă, variaţia vitezei acestui punct este pentru fiecare din cei doi observatori diferenţa a două viteze şi contribuţiile datorite

mişcării relative uniforme a celor două S.C.-uri se elimină cînd se calculează diferenţa. De aceea, variaţia vitezei este un invariant, însă, bineînţeles numai cu condiţia ca mişcarea relativă a celor două S.C.-uri să fie uniformă. Altfel, variaţia vitezei ar fi diferită în cele două S.C.-uri, diferenţa provenind din variaţia vitezei mişcării relative a celor două bare ce reprezintă sistemele noastre de coordonate.
Şi acum, ultimul exemplu. Avem două puncte materiale asupra cărora acţionează forţe care depind numai de distanţă. In cazul mişcării relative rectilinii a sistemelor, distanţa

dintre cele două puncte este invariantă, prin urmare, în exemplul de faţă, şi forţa. Legea lui Newton, care leagă forţa cu variaţia vitezei, va fi deci valabilă în cele două S.C.-uri. Regăsim concluzia confirmată de experienţa de toate zilele : dacă legile mecanicii sînt valabile într-un S.C, atunci ele sînt valabile în orice S.C. care se mişcă uniform unul faţă de altul. Am raţionat pe exemplul, fără îndoială foarte simplu, al mişcării rectilinii a ambelor sisteme, în care caz sistemele de axe de coordonate pot fi reprezentate prin două bare rigide. Concluziile noastre au însă valabilitate generală. Ele pot fi rezumate după cum urmează :
1. Nu cunoaştem nici o regulă pentru a găsi un sistem inerţial. Dacă ne este însă dat un sitem inerţial, putem găsi un număr infinit de asemenea sisteme, deoarece toate sistemele de coordonate care se mişcă uniform unul faţă de altul sînt inerţiale, dacă unul din ele este inerţial.
2. Timpul ce corespunde unui eveniment este acelaşi în toate S.C, dar coordonatele şi vitezele sînt diferite şi variază conform legilor de transformare.
3. Deşi coordonatele şi vitezele variază cînd trecem de la un S.C. la altul, forţa şi variaţia vitezii şi prin urmare legile mecanicii sînt invariante faţă de legile de transformare (dacă cele două S.C -uri se mişcă uniform unul faţă de altul).
Legile de transformare formulate acum pentru coordonate şi viteze le vom numi legile de transformare ale mecanicii clasice sau, mai scurt, transformarea clasică.

§ 26. ETERUL ŞI MIŞCAREA

Principiul relativităţii al lui Galileu este valabil pentru fenomenele mecanice. Aceleaşi legi ale mecanicii se aplică în toate sistemele inerţiale care se mişcă unul faţă de altul. Este valabil acest principiu şi pentru fenomenele nemecanice, în particular pentru acelea la care conceptul de cîmp s-a dovedit atît de important ? Complexul de probleme grupate în jurul acestei chestiuni ne va conduce îndată la punctul de plecare al teoriei relativităţii.
Ne amintim că viteza luminii în vid sau cu alte cuvinte în eter este de 186 000 mile pe secundă (300 000 km/s) şi că lumina este o undă electromagnetică care se propagă prin eter. Cîmpul electromagnetic transportă energie, care, o dată emisă de izvorul ei, are o existenţă autonomă. Pentru moment, vom continua să considerăm eterul drept un mediu în care se propagă unde electromagnetice şi prin urmare şi unde de lumină, deşi sintem pe deplin conştienţi de numeroasele dificultăţi cu privire la structura lui mecanică.
Să admitem că ne găsim într-o cameră închisă, izolată de lumea exterioară, astfel încît să nu poată pătrunde sau ieşi de loc aer. Stînd nemişcaţi şi vorbind, din punctul de vedere fizic, producem unde sonore emise de ur> izvor în repaus, care se propagă cu viteza sunetului în aer. Dacă între gură şi ureche n-ar fi aer sau alt mediu material, nu am putea recepţiona nici un sunet. Experienţa a arătat că viteza sunetului în aer este aceeaşi în toate direcţiile dacă nu este vînt şi dacă aerul este în repaus in sistemul de axe de coordonate ales.
Să ne închipuim acum camera noastră în mişcare uniformă în spaţiu. Un observator din exteriorul ei vede prin pereţii ei de sticlă (sau ai trenului dacă preferaţi) tot ce se petrece în interiorul camerei în mişcare. Din măsurări, observatorul din interior poate deduce viteza sunetului faţă de S.C.-ul său, legat de corpurile înconjurătoare, faţă de care camera este în mişcare. Aceasta nu este altceva decît mult discutata problemă a determinării vitezei într-un S.C. dacă o cunoaştem deacum în altuL

Observatorul din cameră declară : pentru mine viteza sunetului este aceeaşi in toate direcţiile.
Observatorul de afară declară : în sistemul meu de coordonate, viteza sunetului care se propagă în camera în mişcare nu este aceeaşi în toate direcţiile : în direcţia mişcării camerei, ea este mai mare decît viteza normală a sunetului, iar în direcţia opusă, mai mică.
Aceste concluzii decurg din transformarea de coordonate clasică şi pot fi confirmate de experienţă. Intrucît camera antrenează cu ea mediul material în care se propagă undele sonore, adică aerul, viteza sunetului va fi diferită pentru observatorul din interior şi pentru cel din exterior.

Putem trage şi alte concluzii din teoria care consideră sunetul o undă ce se propagă într-un mediu material. Un mijloc de a nu auzi ce spune cineva, deşi nu cel mai simplu, este de a alerga cu o viteză mai mare decît sunetul faţă de aerul care îl înconjură pe cel care vorbeşte. In condiţiile acestea, undele sonore emise nu vor putea niciodată ajunge la urechea noastră.
De asemenea, dacă n-am auzit un cuvînt important care nu va fi repetat, l-am putea totuşi prinde : n-am avea decît să alergăm cu viteză mai mare decît a sunetului, ajungînd astfel din urmă unda emisă.
Nici unul din aceste două exemple nu conţine nimic neraţional, cu excepţia faptului că în amîndouă cazurile ar trebui să alergăm cu o viteză de aproape 350 m/s. Putem admite foarte bine că progresul tehnicii va face accesibilă această viteză. Un obuz aruncat dintr-un tun se mişcă efectiv cu o viteză mai mare decît a sunetului şi un om călare pe un asemenea obuz nu ar auzi niciodată zgomotul împuşcăturii.
Dat fiind că toate aceste exemple au un caracter pur mecanic, este cazul să formulăm acum următoarea întrebare importantă : putem oare repeta, în cazul unei unde de lumină, ceea ce am spus mai sus cu privire la unda sonoră ? Principiul relativităţii al lui Galileu şi transformarea clasică se aplică în egală măsură fenomenelor optice şi electrice ca şi celor mecanice ? Ar fi

riscant să răspundem la aceste Întrebări pur şi simplu printr-un ,4a4' sau „nu" fără a le analiza semnificaţia.
In cazul undei sonore emise în camera care se mişca uniform faţă de observatorul din exteriorul ei, concluzia noastră s-a bazat pe două premize esenţiale :
Camera în mişcare antrenează aerul în care se propagă unda sonoră.
Vitezele observate în două S.C.-uri care se mişcă uniform unul faţă de altul sînt legate prin transformarea clasică de coordonate.
Problema corespunzătoare pentru lumină trebuie însă formulată într-un mod puţin diferit : observatorii din cameră nu vorbesc, ci emit, în toate direcţiile, semnale luminoase, adică unde de lumină. Vom mai presupune că izvoarele semnalelor luminoase sînt în repaus permanent în cameră şi că undele de lumină înaintează prin eter întocmai ca sunetul în aer.
Este eterul antrenat de cameră întocmai ca şi aerul? Deoarece nu ne-am putut face nici o reprezentare mecanicistă a eterului, este extrem de greu să răspundem la această întrebare. Dacă încăperea este închisă, aerul din interiorul ei este silit să se deplaseze împreună cu ea. Evident, nu are nici un sens să tratăm eterul în acelaşi rnod, deoarece materia este toată cufundată în el şi el pătrunde peste tot. Nu există uşă închisă pentru eter. In cazul acesta, „camera în mişcare" ar reprezenta numai un sistem de coordonate solidar cu izvorul de lumină. Totuşi, nu este absurdă nici presupunerea că eterul ar fi antrenat de camera ce se mişcă împreună cu izvorul de lu-^ mină, în modul în care izvorul de sunete şi aerul fuseseră antrenate de camera închisă. Putem însă admite cu aceeaşi îndreptăţire şi contrariul : camera călătoreşte prin eter întocmai ca un vapor pe o mare fără valuri, fără a antrena nici o părticică din mediu, ci numai străbătîndu-L In prima noastră ipoteză, camera în mişcare cu izvorul ei de lumină antrenează eterul. Analogia cu unda sonoră este posibilă şi se pot trage concluzii asemănătoare. în cea de a doua ipoteză, camera în mişcare împreună cu izvorul de lumină nu antrenează eterul. Nu este posibilă nici o analogie cu unda sonoră şi concluziile deduse în ca

zul undelor sonore nu sînt valabile pentru undele de lumină. Acestea sînt cele două posibilităţi extreme. Am putea imagina posibilităţi mai complicate, intermediare, presupunînd că eterul este antrenat numai parţial de camera care se mişcă cu izvorul de lumină. Nu are insă nici un sens să discutăm presupunerile mai complicate înainte de a stabili în favoarea căruia din cele două cazuri limită se pronunţă experienţa,
Vom începe cu prima noastră ipoteză şi vom presupune mai întîi că eterul este antrenat de camera care se mişcă, izvorul fiind solidar cu ea. In aceste condiţii, dac4 admitem valabilitatea principiului simplu de transformare a vitezelor undelor sonore, putem aplica şi undelor de lumină concluziile noastre. Or, nu avem nici o raţiune să punem la îndoială exactitatea legilor simple de transformare din mecanică, ce afirmă numai că vitezele tre-

buie însumate în unele cazuri şi scăzute în altele. Pentru moment, să admitem, totuşi, atît că eterul este antrenat de camera care se mişcă, uniform, împreună cu izvorul ei, cît şi valabilitatea transformării clasice.
Aprind lumina ; de la izvorul solidar cu încăperea mea porneşte un semnal luminos a cărui viteză are binecunoscuta valoare experimentală de 300 000 km/s. Observatorul exterior va înregistra mişcarea camerei şi implicit a sursei, şi cum eterul este antrenat de cameră, concluzia lui va fi că viteza luminii în S.C.-ul său exterior, este diferită în direcţii diferite şi anume : în direcţia de mişcare a camerei este mai mare decît viteza normală a luminii iar în direcţia opusă, mai mică. In concluzie : dacă eterul este antrenat de camera care se mişcă cu izvorul ci dje lumină şi dacă legile din mecanică sînt valabile, atunci viteza luminii trebuie să depindă de viteza izvorului de lumină. Lumina care ajunge la ochiul nostru venind de la un izvor de lumină în mişcare ar trebui să aibă o viteza mai mare sau mai mică, după cum izvorul se apropie sau se îndepărtează de noi.
Dacă viteza noastră ar fi mai mare decît cea a luminii am putea, de exemplu, să fugim din calea unui semnal de lumină. De asemenea, am putea asista la evenimente din trecut, ajungînd din urmă undele de lumină emise

anterior. Intrucît le-am prinde din urmă în ordinea inversa celei în care fuseseră ele emise, succesiunea întîmplărilor de pe Pămînt ne-ar apărea ca într-un film rulat invers, începînd cu sfîrşitul. Aceste concluzii decurg toate din presupunerea că S.C.-ul în mişcare antrenează eterul şi că legile de transformare din mecanică sînt valabile, bacă este într-adevăr aşa, analogia dintre lumină şi sunet este perfectă.
Totuşi, nu există nici o indicaţie care să confirme exactitatea acestor concluzii. Dimpotrivă, ele sint contrazise de toate observaţiile întreprinse în scopul de a le dovedi. Nu există nici cea mai mică îndoială cu privire la caracterul categoric al acestui verdict deşi el a fost do-bîndit prin experienţe cam indirecte, date fiind marile dificultăţi tehnice determinate de valoarea enormă a vitezei luminii. Viteza luminii este întotdeauna aceeaşi în toate S.C.-urile, indiferent dacă sursa emiţătoare se mişcă şi indiferent cum se mişcă. Nu vom intra în descrierea amănunţită a numeroaselor experienţe care au condus la această concluzie importantă. Putem totuşi prezenta unele argumente foarte simple care, chiar dacă nu demonstrează că viteza luminii este independentă de mişcarea sursei sale, fac totuşi plauzibil şi inteligibil acest fapt.
în sistemul nostru planetar, Pămîntul şi celelalte planete se mişcă în jurul Soarelui. Nu avem cunoştinţă de existenţa altor sisteme planetare asemănătoare cu al nostru. Cunoaştem în schimb foarte multe sisteme de stele duble, care constau din două stele ce se rotesc în jurul unui acelaşi punct numit centrul lor de greutate. Observarea mişcării acestor stele duble confirmă valabilitatea legii gravitaţiei a lui Newton. Să presupunem acum că viteza luminii depinde de viteza corpului care o emite. Atunci mesajul trimis de stea, adică raza de lumină emisă de ea, ar călători mai repede sau mai încet după viteza pe care o are steaua în momentul emisiunii. In aceste condiţii, întreaga mişcare ar apărea difuză şi ne-ar fi imposibil să confirmăm, în cazul unor stele duble îndepărtate, valabilitatea legilor gravitaţionale care guvernează sistemul nostru planetar.

Să considerăm o a doua experienţă care se bazează pe o idee foarte simplă. Să ne imaginăm o roată care se în-virte foarte repede. Potrivit ipotezei noastre, eterul este antrenat în mişcare şi ia parte la ea. O rază de lumină care trece pe lîngă periferia roţii nu va avea aceeaşi viteză cînd roata este în repaus şi cînd ea este în mişcare. Viteza luminii în eterul in repaus ar fi diferită de aceea în eterul antrenat rapid de mişcarea roţii, după cum viteza unei unde sonore nu este aceeaşi în zile calme şi în zile cu vînt. Dar, nici o asemenea diferenţă nu a putut fi pusă în evidenţă. Indiferent din ce unghi de vedere atacăm acest subiect şi indiferent ce experienţă crucială am imagina, sentinţa se rosteşte întotdeauna împotriva presupunerii că eterul este antrenat de mişcare. Ca atare, concluzia consideraţiilor noastre, sprijinită pe argumente mai amănunţite şi mai tehnice este :
Viteza luminii nu depinde de mişcarea sursei care o emite. Presupunerea că eterul este antrenat de corpurile în mişcare nu corespunde realităţii.

Trebuie dar să părăsim analogia dintre undele sonore şi cele de lumină şi să luăm în considerare a doua posibilitate : că toată materia se mişcă prin eter, iar acesta nu ia parte cîtuşi de puţin la mişcare. Aceasta revine la a presupune că există o mare de eter faţă de care toate S.C.-urile sînt în repaus sau în mişcare. Presupunem că părăsim, pentru un moment, problema dacă experienţa confirmă sau dezminte această teorie. Voim mai curînd să ne familiarizăm cu semnificaţia acestei noi ipoteze şi cu concluziile care decurg din ea.
Am admis deci că ar exista un S.C. în repaus faţă de marea de eter imobilă. In mecanică nu putusem individualiza nici unul din multele S.C.-uri în mişcare uniformă unul faţă de altul. Ele erau toate, fie deopotrivă de „bune'4, fie deopotrivă de „rele". In mecanică, dacă avem două S.C.-uri care se mişcă uniform unul faţă de celălalt, întrebarea care dintre ele este în mişcare şi care în repaus nu are nici o semnificaţie : singurul lucru care se poate observa este mişcarea lor relativă. Potrivit principiului relativităţii al lui Galileu nu putem vorbi de mişcare uniforma absolută. Dar ce semnificaţie are în fond afirmaţia

că există o mişcare uniformă absolută şi nu numai una relativă? Pur şi simplu că există un S.C. în care unele din legile naturii au altă formă decît în toate celelalte sisteme ; de asemenea că fiecare observator poate stabili dacă S.C.-ul lui este în repaus sau în mişcare uniformă, com-parînd legile valabile in el cu cele valabile în sistemul unic, care are monopolul absolut de a servi drept S.C. standard. Situaţia aceasta este diferită de aceea din mecanica clasică, unde din cauza legii inerţiei a lui Galileu» mişcarea uniformă absolută este cu totul lipsită de semnificaţie.
Ce concluzie poate fi trasă în domeniul fenomenelor de cîmp dacă se admite ipoteza mişcării prin eter? Aceasta ar însemna că există un S.C. deosebit de toate celelalte,, în repaus faţă de marea de eter. Este limpede că unele din legile naturii ar trebui să fie diferite în acest S.C.» altminteri expresia „mişcarea prin eter" ar fi lipsită de sens.
Dacă este valabil principiul relativităţii al lui Galileu., atunci mişcarea prin eter este lipsită de semnificaţie-Este imposibil să punem de acord aceste două idei. Am admis, totuşi, că există un S.C. privilegiat, fixat de eter, prin urmare, implicit, că „mişcarea uniforma absolută" şi „repausul absolut4' au o semnificaţie obiectivă.
Nu avem de fapt nici o alegere. încercăm să salvăm principiul relativităţii al lui Galileu, presupunînd că sistemele antrenează eterul în mişcarea lor, dar aceasta conduce la o contrazicere cu experienţa. Nu ne rămîne decît să părăsim acest principiu al relativităţii şi să vedem ce rezultă din presupunerea că toate corpurile în mişcare străbat o mare de eter imobilă.
Pasul următor pe care-1 facem este să considerăm unele concluzii cari contrazic principiul relativităţii al lui Galileu şi concordă cu teza mişcării prin eter, şi să le confruntăm cu experienţa. Experienţele corespunzătoare sînt destul de uşor de imaginat, dar foarte greu de efectuat. Deoarece dezbatem aici numai idei, nu este nevoie să ne preocupăm de dificultăţile tehnice.
Să ne întoarcem din nou la camera în mişcare şi ia cei doi observatori, cel din interiorul camerei şi cel din

exteriorul ei. Observatorul din exterior va considera S.C.-ul standard legat de marea de eter. Este vorba de S.C.-ul privilegiat în care viteza luminii are întotdeauna aceeaşi valoare standard. Lumina emisă de orice sursă se propagă cu aceeaşi viteză, indiferent dacă sursa este în mişcare sau în repaus faţă de marea de eter. Să admitem că în timp ce camera şi observatorul din interiorul ei străbat eterul, în centrul camerei se aprinde şi se stinge fulgerător o lumină. Să mai admitem că pereţii camerei sînt transparenţi astfel că observatorii, atît cel din interior cît şi cel din afară, pot măsura viteza luminii, Intrebîndu-1 acum pe fiecare în parte, care este rezultatul aşteptat de el, răspunsurile ar suna cam astfel :
Observatorul din exterior; S.C.-ul meu este indicat de către marea de eter. In S.C.-ul meu, viteza luminii are întotdeauna valoarea standard. Nu mă interesează dacă izvorul de lumină sau alte corpuri sînt în mişcare pentru că ele nu antrenează niciodată marea de eter. S.C.-ul meu este privilegiat faţă de celelalte, în el viteza luminii trebuie să aibă

valoarea standard, indiferent de direcţia razei de lumină sau de mişcarea izvorului care o emite.
Observatorul din interior ; camera mea străbate eterul. Unul din pereţii ei se îndepărtează de lumină, cel opus se apropie de ea. Dacă încăperea mea s-ar deplasa faţă de marea de eter cu viteza luminii, atunci lumina emisă din centrul camerei nu ar atinge niciodată peretele, care se îndepărtează cu viteza luminii. Dacă încăperea ar înainta cu o viteză mai mică decît aceea a luminii, atunci o undă emisă din centrul ei ar atinge unul din cei doi pereţi înaintea celuilalt. Peretele care se mişcă spre lumină ar fi atins mai devreme, decît cel care se îndepărtează de lumină. De aceea, deşi izvorul de lumină este solidar cu S.C.-ul meu, viteza luminii nu va fi aceeaşi în toate direcţiile. Ea va fi mai mică in direcţia de mişcare relativă in raport cu marea de eter, întrucît peretele corespunzător fuge din calea luminii, şi mai mare în direcţia opusă, întrucît peretele opus vine în întîmpinarea undei.
Prin urmare, viteza luminii va fi aceeaşi în toate direcţiile, numai într-un S.C. legat de marea de eter. Pentru

alte S.C.-uri care se mişcă faţă de marea de eter ea va depinde de direcţia în care este măsurată.
Experienţa crucială discutată mai sus ne dă posibilitatea să verificăm teoria mişcării faţă de marea de eter. în adevăr, natura ne pune la dispoziţie un sistem care se deplasează cu o viteză destul de mare, Pămîntul in mişcarea lui de revoluţie în jurul Soarelui. Dacă ipoteza noastră este corectă, atunci în direcţia de mişcare a Pămîntului, viteza luminii va avea altă valoare decît în direcţia opusă. Diferenţa poate fi calculată şi se poate concepe o experienţă de verificare adecuată. Dată fiind micimea diferenţelor de timp prevăzute de teorie, a fost nevoie să se imagineze dispozitive experimentale foarte ingenioase, între altele, în cadrul vestitei experienţe a lui Michelson şi Morley. Rezultatul acestei experienţe a însemnat condamnarea la moarte a teoriei mării liniştite de eter pe care ar străbate-o materia în mişcarea ei. Nu s-a putut stabili nici o dependenţă de direcţie a vitezei luminii. Dar, potrivit teoriei eterului, nu numai viteza luminii, ci şi alte fenomene de cîmp ar trebui să prezinte o dependenţă de direcţie în S.C.-ul în mişcare. Toate experienţele au dat acelaşi rezultat negativ ca experienţa Michelson-Morley ; nici una din ele nu a putut pune în evidenţă dependenţa vreunui fenomen de direcţia mişcării Pămîntului.
Situaţia devenea din ce în ce mai critică. Au fost încercate două ipoteze. Prima, că eterul este antrenat de corpurile în mişcare. Această ipoteză este contrazisă de faptul că viteza luminii nu depinde de mişcarea izvorului. A doua, că există un sistem de coordonate privilegiat şi că în mişcarea lor corpurile nu antrenează eterul, ci străbat o mare de eter în permanenţă calmă. Dar în cazul acesta principiul relativităţii al lui Galileu nu mai este valabil, iar viteza luminii nu poate fi aceeaşi în orice S.C, şi din nou sîntem în contrazicere cu experienţa.
S-au propus teorii, mai artificiale, care presupuneau că adevărul este undeva la mijloc între aceste două cazuri extreme : că eterul ar fi antrenat numai parţial de corpurile în mişcare. Dar toate au dat greş ! Toate încercările de a explica fenomenele electromagnetice în S.C.-ul

în mişcare, fie cu ajutorul mişcării eterului, fie cu ajutorul mişcării prin eter sau cu ajutorul ambelor mişcări nu au avut succes.
S-a creat astfel una din cele mai dramatice situaţii din istoria ştiinţei. Nici una din ipotezele privitoare la eter n-a avut succes ; verdictul experimental a fost de fiecare dată negativ. Aruneînd o privire retrospectivă asupra dezvoltării fizicii constatăm că eterul, curînd după naşterea lui, s-a afirmat ca un „enfant terrible" al familiei substanţelor fizice. Mai întîi, construirea unei imagini mecanice simple a eterului s-a dovedit a fi imposibilă şi a fost părăsită. Faptul acesta a provocat, în mare măsură, falimentul punctului de vedere mecanicist şi, în al doilea rînd, am fost nevoiţi să renunţăm la speranţa de a putea individualiza, ca urmare a existenţei mării de eter imobile, un sistem privilegiat care să permită identificarea mişcării absolute uniforme. Acesta ar fi fost singurul mod în care eterul ar fi putut să-şi manifeste şi să-şi justifice existenţa şi altfel decît ca purtător de

unde. Toate încercările noastre de a da un caracter real eterului au eşuat. El nici nu şi-a dat în vileag structura lui mecanică, nici n-a dus la identificarea mişcării absolute. Din toate proprietăţile eterului, nu s-a menţinut decît una singură, cea pentru care fusese inventat, adică proprietatea de a transmite unde electromagnetice. încercările noastre de a stabili proprietăţile eterului au condus la dificultăţi şi contraziceri. După asemenea experienţe dezagreabile a sosit momentul să dăm cu desăvîrşire uitării eterul şi să încercăm să nu-i mai pronunţăm numele. De acum înainte vom spune : spaţiul nostru are proprietatea fizică de a transmite unde, ocolind întrebuinţarea unui cuvînt pe care ne-am propus să-1 evităm.
Fireşte că suprimarea unui cuvînt din vocabularul nostru nu constituie un remediu. Complicaţiile noastre sînt în realitate mult prea grave pentru a putea fi lichidate în felul acesta !
Să consemnăm acum faptele care ne-au fost confirmate suficient de experienţă fără a ne mai preocupa de aici înainte de problema „e--r"-ului.

Evoluţia fi zidi
1. Viteza luminii în vid are întotdeauna valoarea standard, indiferent de mişcarea sursei sau a observatorului.
2. Orice lege a naturii este absolut identică în două S.C.-uri în mişcare uniformă unul faţă de altul şi nu există nici un mi.iloc de a identifica mişcarea uniformă şi absolută.
Există multe experienţe care confirmă aceste două propoziţii şi nici una care să le contrazică. Prima afirmaţie exprimă constanţa vitezei luminii, a doua generalizează, pentru toate fenomenele din natură, principiul relativităţii al lui Galileu, formulat pentru fenomenele mecanice.
în mecanică am văzut că, dacă viteza unui punct material are o valoare anumită faţă de un S.C, ea va avea altă valoare în alt S.C, în mişcare uniformă faţă de primul. Aceasta decurge din legile simple ale transformării din mecanică. Ele ne sînt date imediat de intuiţia noastră (mişcarea unui om în raport cu un vapor sau cu ţărmul) şi, evident, nu pot conţine nimic greşit. Dar această transformare contrazice caracterul constant al vitezei luminii. Cu alte cuvinte, adăugăm un al treilea principiu :
3. Poziţiile şi vitezele se transformă dintr-un sistem inerţial în altul, în concordanţă cu transformarea clasică.
Contradicţia este evidentă. Nu se poate combina 1 cu 2 şi cu 3.
Transformarea clasică pare prea evidentă şi prea simw plă pentru a avea sens ca să o modificăm. Propoziţiile de la 1 şi 2 am încercat să le modificăm şi am ajuns la o contrazicere cu experienţa : toate teoriile privitoare la mişcarea „e-r"ului ceruseră modificarea lui 1 şi 2, ceea ce
n-a dus la ceva bun. Constatăm din nou caracterul serios al dificultăţilor noastre. Avem nevoie de un nou fir conducător. El ne este furnizat de acceptarea ipotezelor fundamentale 1 şi 2 şi, oricit de straniu ne-ar părea, de părăsirea ipotezei 3. Această nouă concepţie porneşte de la analiza noţiunilor fundamentale şi primitive ; vom a-răta cum această analiză ne constrînge să ne schimbăm concepţiile noastre vechi şi înlătură toate dificultăţile.
Cîmp, relativitate

§ 27. DURATA, DISTANŢĂ, RELATIVITATE
Noile noastre ipoteze sînt :
1. în vid, viteza luminii este aceeaşi în orice S.C. care se mişcă uniform unul faţă de altul.
2. Orice lege a naturii este identică în toate S.C.-urile care se mişcă uniform unul faţă de altul.
Cu aceste două ipoteze am păşit pe terenul teoriei relativităţii. De acum înainte nu vom mai folosi transformarea clasică deoarece ştim că ea contrazice ipotezele noastre.
în problema aceasta, şi în general în ştiinţă, este esenţial să ne eliberăm de idei preconcepute, adînc înrădăcinate, repetate deseori fără a le supune unui examen critic. Deoarece am văzut că modificarea ipotezelor 1 sau 2 conduce la contraziceri cu experienţa, trebuie să avem curajul să postulăm în mod categoric valabilitatea lor şi să atacăm singurul punct slab posibil : modul în care se transformă poziţiile şi vitezele cînd trecem de la un S.C. la altul. Ne propunem acum să tragem concluzii din 1 şi 2, să vedem

unde şi cum se contrazic aceste ipoteze cu transformarea clasică şi să găsim sensul fizic al rezultatelor obţinute.
Ne vom servi din nou de exemplul cu camera în mişcare şi cu cei doi observatori, cel din exterior şi cel din interior. Vom presupune din nou că în centrul camerei se emite un semnal luminos şi vom întreba din nou pe cei doi observatori ce se aşteaptă ei să observe, dacă admit numai cele două principii, uitînd tot ce s-a spus mai înainte cu privire la mediul prin care se propagă lumina. Citäm răspunsurile lor :
Observatorul din interior: Semnalul luminos, pornind din centrul camerei, va atinge cei doi pereţi simultan, deoarece ei sînt la aceeaşi distanţă de izvorul de lumină, iar viteza luminii este aceeaşi în toate direcţiile.
Observatorul din exterior: în sistemul meu, viteza luminii este exact aceeaşi ca în cel al observatorului care se mişcă o dată cu camera. Nu interesează dacă izvorul de lumină se mişcă sau nu în S.C.-ul meu, deoarce mişcarea lui nu influenţează viteza luminii.
Semnalul luminos

pe care-1 înregistrez înaintează cu viteza standard, care este aceeaşi în toate direcţiile. Unul din pereţi fuge din calea semnalului luminos, iar peretele opus vine în in-tîmpinarea lui. De aceea, peretele care se îndepărtează va primi semnalul puţin mai tîrziu decît cel care se apropie. Deşi diferenţa va fi foarte mică, dacă viteza camerei este mică faţă de cea a luminii, totuşi semnalul luminos nu va ajunge chiar simultan la cei doi pereţi opuşi, perpendiculari pe direcţia mişcării.
Comparînd prezicerile celor doi observatori, ajungem la un rezultat uimitor, care contrazice în mod flagrant conceptele în aparenţă bine întemeiate ale fizicii clasice. Două evenimente, adică atingerea celor doi pereţi de către două raze de lumină, sînt simultane pentru observatorul din interior, nu însă şi pentru observatorul din exterior. In fizica clasică aveam un singur ceasornic, o singură scurgere a timpului pentru toţi observatorii din toate S.C.-urile. Timpul şi prin urmare termenii „simultan*', „anterior", „posterior" aveau o semnificaţie absolută, independentă de orice S.C. Două evenimente care se produceau în acelaşi timp într-un S.C. se produceau în mod obligatoriu simultan în toate celelalte S.C.-uri.
Ipotezele 1 şi 2, adică teoria relativităţii, ne con-strîng să părăsim acest punct de vedere. Am descris exemplul a două evenimente care într-un S. C. se produc în acelaşi timp şi în alt S.C, la momente diferite. Sarcina noastră actuală este să înţelegem această consecinţă, să înţelegem semnificaţia afirmaţiei : „este posibil ca două evenimente simultane într-un S.C, să nu fie simultane în alt S.C."
Ce înţelegem prin „două evenimente simultane într-un S.C." ? Intuitiv, fiecare din noi are impresia că înţelege această afirmaţie. Dar să încercăm a fi precauţi, să încercăm să dăm definiţii riguroase, căci ştim cît de primejdios este să supraestimăm intuiţia noastră. Să răspundem întîi la o întrebare simplă.
Ce este un ceasornic ?
Senzaţia primară subiectivă de scurgere a timpului ne dă posibilitatea să ne ordonăm impresiile, să apreciem

dacă un eveniment s-a produs înaintea altuia sau după el. Dar pentru a stabili că intervalul dintre două evenimente este de exemplu de 10 secunde, avem nevoie de un ceasornic. Prin folosirea ceasornicului, noţiunea de timp devine obiectivă. Orice fenomen fizic poate îndeplini funcţiunea de ceasornic cu condiţia de a putea fi reprodus în mod identic ori de cîte ori dorim. Luînd ca unitate de timp intervalul dintre începerea şi terminarea unui astfel de eveniment, se pot măsura intervale de timp arbitrare, prin repetarea acestui proces fizic. Toate ceasornicele, începînd de la cel cu nisip şi pînă la instrumentele cele mai perfecţionate, se bazează pe acest principiu. In cazul ceasornicului cu nisip, unitatea de timp este intervalul în care se scurge nisipul din rezervorul de sus în cel de jos. Acest proces fizic poate fi repetat întorcînd ceasornicul. In două puncte distanţate unul de altul vom considera două ceasornice perfecte, care indică exact aceeaşi oră. Vrem ca această afirmaţie să rămînă în picioare oricît de mare ar fi precizia cu care am verifica-o. Dar ce înseamnă ea în realitate ? Cum am putea să ne asigurăm că cele două ceasornice, distanţate, indică exact aceeaşi oră ? Am putea, de

exemplu, să folosim televiziunea. Să fim însă lămuriţi că televiziunea reprezintă numai un procedeu posibil şi nu este esenţială pentru raţionamentul nostru. Am. putea dşci să ne situăm aproape de unul din ceasornice privind imaginea televizată a celuilalt. în felul acesta am putea aprecia dacă ele indică aceeaşi oră în mod simultan. Dar criteriul acesta nu ar fi corect. Imaginea televizată fiind transmisă prin unde electromagnetice, se propagă cu viteza luminii. Televiziunea ne furnizează deci o imagine emisă cu foarte puţin timp mai devreme,, în timp ce pe ceasornicul real am vedea ceea ce se în-tîmplă chiar în momentul respectiv. Această dificultate poate fi însă înlăturată. Este de ajuns să recepţionăm imaginile televizate ale celor două ceasornice, într-un punct situat la o distanţă egală de amîndouă. Atunci, dacă semnalele sînt emise simultan, vor sosi tot simultan. Dacă două ceasornice bune, observate de la jumătatea distanţei dintre ele, vor arăta mereu acelaşi timp atunci ele sînt

apte să indice timpul a două evenimente care se produc in două puncte depărtate unul de altul.

în mecanică ne-am folosit de un singur ceasornic. Dar situaţia aceasta nu era prea comodă, deoarce eram nevoiţi să facem toate măsurătorile în imediata vecinătate a acestui unic ceasornic. Citind indicaţia unui ceasornic de la distanţă, de exemplu prin televiziune, nu trebuie să pierdem din vedere faptul că ceea ce vedem la un moment dat, în realitate s-a petrecut mai devreme, după cum urmărind un apus de Soare înregistrăm în fiecare moment un eveniment care are loc cu 8 minute mai devreme. Trebuie deci să corectăm toate lecturile timpului •citit, ţinînd seama de distanţa pînă la ceasornic.

De aceea nu este comod să avem un singur ceasornic, Acum, însă, cînd ştim cum să apreciem dacă două sau mai multe ceasornice indică acelaşi timp în mod simultan precum şi dacă merg în acelaşi ritm, putem foarte bine să ne imaginăm cîte ceasornice vrem într-un S.C. dat. ^Fiecare din ele ne va ajuta să determinăm timpul evenimentelor care se petrec în imediata lui apropiere. Ceasornicele sînt toate în repaus faţă de S.C. Ele sînt cea-.sornice „bune" şi sînt sincronizate, adică toate indică Simultan aceeaşi oră. Aşezarea ceasornicelor noastre nu conţine nimic prea izbitor sau bizar.

Vom folosi acum mai multe ceasornice sincronizate în locul unuia singur şi, ca atare, vom putea aprecia mai uşor dacă două evenimente depărtate sînt sau nu simultane într-un S.C. dat. Ele sînt simultane dacă ceasornicele sincronizate situate în vecinătatea lor indică acelaşi timp în momentul în care au loc evenimentele. Acum, afirmaţia că unul din evenimentele îndepărtate se produce înaintea celuilalt, are cu adevărat o semnificaţie definită. Toate acestea pot fi stabilite cu ajutorul ceasornicelor sincronizate, în repaus faţă de S.C.-ul nostru.

Cele de mai sus sînt in concordanţă cu fizica clasică ; pînă în prezent nu a intervenit ceva care să contrazică transformarea clasică.

Pentru definirea unor evenimente simultane, ceasornicele sînt sincronizate cu ajutorul semnalelor. Este

esenţial pentru dispozitivul nostru că aceste semnale înaintează cu viteza luminii, viteză care joacă un rol atît de fundamental în teoria relativităţii.

Deoarece intenţionăm să ne ocupăm de problema importantă a mişcării relative uniforme a două S.C, vom considera două bare prevăzute fiecare cu ceasornice. 3n fiecare din cele două S.C.-uri care se mişcă unul faţă de altul, observatorul are bara sa proprie şi ansamblul lui propriu de ceasornice solidare cu bara.

în mecanica clasică, de cîte ori a fost vorba de o măsurătoare, ne-am folosit de un singur ceasornic pentru toate S.C. Aici avem multe ceasornice în fiecare S.C. Diferenţa aceasta nu este însă esenţială. Un ceasornic ne-ar fi fost suficient, dar nimeni nu poate să ridice vreo obiecţie împotriva folosirii mai multor ceasornice, cîtă vreme ele se comportă cum se cuvine unor ceasornice bine sincronizate.

Ne-am apropiat acum de punctul esenţial arătînd în ce privinţă transformarea clasică este în contradicţie cu teoria relativităţii. Ce se întîmplă dacă două grupuri de ceasornice se mişcă uniform unul faţă de altul ? Fizicianul clasic ar răspunde : nimic ; ele au acelaşi ritm şi timpul poate fi indicat tot atît de corect de un ceasornic în mişcare sau în repaus.

Potrivit fizicii clasice, două e-venimente simultane într-un S.C vor fi simultane în oricare alt S.C.
Dar acesta nu este singurul răspuns posibil. Ne putem imagina tot atît de bine că un ceasornic în mişcare are un ritm diferit de cel al unui ceasornic în repaus. Să discutăm această posibilitate fără a stabili încă dacă în realitate ceasornicele îşi schimbă sau nu ritmul datorită mişcării. Ce se înţelege prin afirmaţia că un ceasornic îşi schimbă ritmul datorită mişcării ? Pentru simplicitate să presupunem că în S.C.-ul superior avem un singur ceasornic şi in cel inferior, mai multe (fig. 57). Toate ceasornicele au aceleaşi mecanisme şi cele de jos sînt sincronizate, adică arată acelaşi timp simultan. Am figurat trei poziţii consecutive ale celor două S.C.-uri în mişcare unul faţă de altul. în prima figură, prin convenţie, arătătoarele cesornicelor de sus şi de jos au aceeaşi

poziţie, pentru că aşa le-am potrivit noi : toate ceasornicele indică acelaşi timp. Poziţia a doua ne arată dispoziţia relativă a celor două S.C.-uri puţin mai tîrziu. In S.C.-ul de jos, toate ceasornicele arată acelaşi timp, dar ceasornicul din S.C.-ul de sus şi-a schimbat ritmul. «Ritmul
lui s-a schimbat şi timpul pe care-1 indică este altul din cauză că ceasornicul se mişcă faţă de S.C-ul de jos. In poziţia a treia vedem cum diferenţa dintre indicaţiile arătătoare-lor a crescut cu timpuL Un observator în repaus în S.C.-ul de jos va constata că un ceasornic în mişcare îşi schimbă aggaaa» ritmul. Evident, un obser-
vator în repaus în S.C.-ul de sus, dispunînd de mai multe ceasornice, ar stabili aceeaşi modificare a ritmului pentru un ceasornic solidar cu S.C.-ul de jos. Legile naturii trebuie să fie identice în a-mîndouă S.C, în mişcare uniformă unul faţă de altul.
Fig. 57 In mecanica clasică
s-a admis tacit că un ceasornic în mişcare nu-şi schimbă ritmul. Lucrul acesta părea atît de evident încît se considera că nici nu este necesar să fie menţionat. Nimic nu trebuie însă considerat prea evident; dacă vrem să fim cu adevărat precauţi trebuie să analizăm şi acele ipoteze pe care, pînă la această dată, fizica le considerase în afară de discuţie. O ipoteză nu trebuie considerată absurdă pentru simplul motiv că nu concordă cu fizica clasică. Putem

foarte bine admite că un ceasornic în mişcare îşi schimbă ritmul cîtă vreme legea acestei variaţii este aceeaşi pentru toate sistemele inerţiale.
încă un exemplu. Să luăm o măsură de un metru, adică, un baston ce are un metru cînd este în repaus într-un S.C. Să presupunem acum că el începe să se mişte uniform, lunecînd în lungul barei care reprezintă S.C.-ul. Va rămîne lungimea lui tot de un metru ? Pentru a răspunde, trebuie mai întîi să ştim să determinăm această lungime. Cîtă vreme bastonul era în repaus, capetele lui coincideau cu două repere distanţate la un metru in S.C. De aici, dedusesem că în repaus lungimea lui era de un metru. Cum trebuie să procedăm acum pentru a măsura bastonul în timpul mişcării ? S-ar putea proceda astfel : la un moment dat doi observatori fac simultan două fotografii instantanee, unul a originii, celălalt a extremităţii barei. Deoarece imaginile sînt luate simultan, din compararea reperelor din S.C, care coincid cu originea, respectiv cu extremitatea bastonului în mişcare, rezultă lungimea lui. Pentru a înregistra două evenimente care se produc simultan, în două puncte diferite ale unui S.C. dat, sînt necesari doi observatori. Nu există deci nici o raţiune pentru a admite a priori că rezultatul unor asemenea măsurări va fi acelaşi ca în cazul cînd bara era în repaus. Intrucît fotografiile trebuie luate simultan, ceea ce, după cum ştim, este o noţiune relativă depinzînd de S.C, se prea poate ca rezultatul acestor măsurări să nu fie acelaşi in două S.C.-uri, care se mişcă unul faţă de celălalt.
Ne putem foarte bine imagina nu numai că ceasornicul în mişcare îşi schimbă ritmul, ci că şi bara în mişcare îşi schimbă lungimea, cu condiţia ca legile de variaţie să fie aceleaşi pentru toate S.C.-urile inerţiale.
Am enunţat unele posibilităţi noi fără a le justifica în vreun fel.
Amintim că viteza luminii este aceeaşi în toate S.C.-urile inerţiale ; or, este imposibil să împăcăm acest fapt cu transformarea clasică : cercul trebuie rupt undeva. Oare nu

tocmai aici ? Nu am putea oare concepe astfel de schimbări ale ritmului unui ceasornic in mişcare

şi ale lungimii unui baston în mişcare încît din ele să decurgă, în mod direct, constanţa vitezei luminii ? Ei bine, putem ! Aceasta este prima dată cînd teoria relativităţii şi fizica clasică se deosebesc radical. Raţionamentul nostru poate fi inversat : dacă viteza luminii este aceeaşi în toate S.C.-urile, atunci barele în mişcare trebuie să-şi schimbe lungimea, ceasornicele în mişcare trebuie să-şi modifice ritmul şi anume după legi perfect determinate.
Nu este nimic misterios, ori absurd, în cele de mai sus. în fizica clasică s-a admis întodeauna că ceasornicele au acelaşi ritm, indiferent dacă sînt în mişcare sau în repaus, că barele au aceeaşi lungime atît în mişcare cit şi în repaus. Dar, dacă viteza luminii este aceeaşi în toate S.C.-urile, dacă teoria relativităţii este valabilă, atunci trebuie să sacrificăm această ipoteză. Este greu să ne eliberăm de prejudecăţi adine înrădăcinate, dar nu avem încotro. Din punctul de vedere al teoriei relativităţii, vechile concepţii apar arbitrare. De ce să credem, cum am făcut nu mai departe decît cu cîteva pagini în urmă, in timpul absolut, care se scurge în acelaşi fel pentru toţi observatorii din toate S.C? De ce să credem că distanţele sînt invariabile ? Durata este determinată cu ceasornice, coordonatele spaţiale cu bare ; prin urmare, rezultatul determinării acestor mărimi ar putea depinde de felul cum se comportă barele şi ceasornicele, cînd se află în mişcare. Nu avem nici o justificare pentru a crede că ele se vor comporta aşa cum ne convine nouă. Observaţiile arată indirect, prin intermediul fenomenelor cîmpului electromagnetic, că un ceasornic in mişcare îşi schimbă efectiv ritmul şi o bară în mişcare, lungimea, ceea ce n-am fi crezut cu putinţă bazîndu-ne numai pe fenomenele mecanice. Trebuie să acceptăm ideea de durată relativă, diferită în fiecare S.C, fiindcă aceasta este cea mai bună ieşire din dificultăţile noastre. Progresul ulterior al ştiinţei realizat pe baza teoriei relativităţii arată, în acelaşi timp, că acest nou mod de a privi lucrurile nu trebuie considerat numai ca un malum necesarium, deoarece avantajele teoriei sînt indiscutabile.
Pînă aici am încercat să înfăţişăm faptele care au dus la ipotezele fundamentale ale teoriei relativităţii şi felul

în care teoria ne-a constrîns să revizuim şi să modificăm transformarea clasică, tratînd timpul şi spaţiul într-un nou mod. Objiectivul nr>stru general e^te să indicăm ideile care stau la baza fiecărei concepţii fizice şi filosofice. In cazul de faţă, aceste idei sînt simple, dar, aşa cum au fost formulate aici, ele nu sînt suficiente pentru a ne conduce la concluzii cantitative şi nu numai calitative. Vom recurge deci din nou la vechea noastră metodă, care consistă în a lămuri numai ideile principale şi a enunţa apoi altele (cîteva) fără demonstraţie.
Pentru a arăta limpede diferenţa dintre concepţia vechiului fizician V care este un susţinător al transformării clasice şi a fizicianului modern M care este un adept al teoriei relativităţii, vom imagina un dialog între ei.
V. Eu sînt convins de valabilitatea principiului relativităţii al lui Galileu în mecanică, deoarce ştiu că legile mecanice sînt aceleaşi în două S.C.-uri care se mişcă uniform unul faţă de altul, cu alte cuvinte sînt convins că aceste legi sint invariante faţă de transformarea clasică.
M. Bine, dar principiul relativităţii trebuie să se a-plice tuturor evenimentelor din lumea exterioară. Nu numai legile mecanicii, ci toate legile naturii trebuie să fie aceleaşi în sistemele de coordonate care se mişcă uniform unul faţă de altul.
V. Dar, cum pot fi identice toate legile naturii în S.C.-urile care se mişcă unul faţă de altul ? Ecuaţiile cîmpului, adlică ecuaţiile lui Maxwell nu sînt invariante faţă de transformarea clasică. Faptul acesta apare limpede în cazul vitezei luminii. Potrivit transformării clasice, această viteză ar trebui să fie diferită în două S.C.-uri care se mişcă unul faţă de altul.
M. Aceasta arată doar că transformarea clasică nu este aplicabilă, că relaţia dintre două S.C. trebuie să fie alta ; că vitezele şi coordonatele nu se transformă potrivit acestor legi. Ele trebuie înlocuite cu noi legi de transformare deduse din ipotezele fundamentale ale

teoriei relativităţii. Să nu ne preocupăm de expresia matematică a acestei legi, ci să ne mulţumim a şti că ea este diferită de cea a transformării clasice. O vom numi pe scurt transformarea lui Lorentz. Se poate arăta că ecuaţiile

lui Maxwell, adică legile cîmpului, sînt invariante faţă de transformarea Lorentz întocmai ca legile mecanicii faţă de transformarea clasică. Să ne amintim care era situaţia în fizica clasică. Aveam legi de transformare pentru coordonate şi legi de transformare pentru viteze, dar legile mecanicii erau aceleaşi pentru două S.C.-uri în mişcare uniformă unul faţă de altul. Aveam legi de transformare pentru spaţiu nu însă şi pentru timp, el fiind acelaşi în toate S.C. în teoria relativităţii lucrurile stau însă altfel : legile de transformare pentru spaţiu, timp şi viteză sînt diferite de cele clasice. Legile naturii sînt tot identice în toate S.C.-urile care se mişcă uniform unul faţă de altul. Ele trebuie însă să fie invariante, nu faţă de transformarea clasică ca înainte, ci faţă de un nou tip de transformare, aşa-numita transformare Lorentz. în toate S.C.-urile inerţiale sînt valabile aceleaşi legi şi trecerea de la un S.C. la altul este dată de transformarea Lorentz.
V. Vă cred pe cuvînt, dar m-ar interesa să cunosc diferenţa dintre transformarea clasică şi cea a lui Lorentz.
M. Vă voi lămuri în felul următor : numiţi-mi pe rînd unele caracteristici ale transformării clasice, iar eu vă voi preciza pentru fiecare in parte dacă s-a conservat în transformarea Lorentz, iar în caz contrar, cum s-a modificat
V. Dacă în S.C.-ul meu se întîmplă ceva într-un punct dat, ia un moment dat, atunci un observator situat în alt S.C. care se mişcă uniform faţă de al meu, atribuie alt număr poziţiei în care are loc acest eveniment, însă evident, acelaşi timp. în toate S.C.-urile noastre, noi folosim acelaşi ceasornic ; nu contează dacă ceasul se mişcă sau nu. Este valabil acest lucru şi pentru Dvs ?
M. Nu, nu este. Fiecare S.C. trebuie să fie prevăzut cu propriul lui ceasornic, în repaus, întrucit mişcarea îi schimbă ritmul. Doi observatori situaţi în două S.C.-uri diferite vor atribui numere diferite nu numai poziţiei, ci şi momentului in care se produce un eveniment.
V. Aceasta înseamnă că timpul nu mai este invariant, în transformarea clasică el este întotdeauna ace

izzzzzzz
laşi în toate S.C.-urile. în transformarea Lorentz el se schimbă, comportîndu-se oarecum ca o coordonată în vechea transformare. Dar cu distanţa ce se întîmplă? Potrivit mecanicii clasice o bară rigidă îşi menţine lungimea fie că este în mişcare, fie că este în repaus. Mai este va- ezzzzzzzzzzzz labil acest lucru a-cum ?
M. Nu, nu mai este. Din transformarea lui Lorentz
rezultă că un baston *^'/w<v?H<vvu/s/HM///////M/w//////7rrr Sn mişcare se con- Fig> 58
tracta în direcţia
mişcării, contracţia crescînd cu viteza. Cu cît bara se mişcă mai repede, cu atît se scurtează mai tare. Dar a-ceasta se întîmplă numai în direcţia mişcării. In fig. 58 puteţi vedea o bară în mişcare reducîndu-se la jumătate, cînd viteza ei atinge cam 90% din viteza lumi-^^^^^^ nii. Perpendicular pe direcţia mişcării, nu are loc însă nici o contracţie cum am încercat să arăt în figura următoare (fig. 59).
V. Aceasta înseamnă că ^ ritmul unui ceasornic în
I i
VttMs///Mw/,/M/u2LUi^Mi lljzz mişcare şi lungimea unui ^ 59 baston în mişcare depind de
&' viteză. Dar în ce fel ?
M. Schimbările devin mai distincte dacă viteza creşte. Din transformarea lui Lorentz rezultă că o bară s-ar anihila dacă ar ajunge să aibă o viteză egală cu a luminii. Asemănător, ritmul unui ceasornic în mişcare este mai lent decît al ceasornicelor prin dreptul cărora trece in lungul barei, iar dacă ceasornicul ar atinge viteza luminii, adică dacă ar fi un ceas „bun", atunci el s-ar opri.

V. Aceasta pare a contrazice întreaga noastră experienţă. Ştim că un automobil nu se scurtează cînd se mişcă şi ştim că un şofer poate să-şi compare ceasul lui >,bun4i cu cele pe care le întilneşte în drumul lui consta-tînd, contrar afirmaţiei Dvs., că ele concordă destul de bine.
M. Este adevărat. Dar vitezele mecanice sînt foarte mici în comparaţie cu cea a luminii, de aceea este ridicol să le aplicăm acestor fenomene relativitatea. Orice şofer ar putea folosi liniştit fizica clasică chiar dacă ar fi să-şi mărească viteza de 100 000 de ori. Nu ne putem aştepta să constatăm un dezacord între experienţă şi transformarea clasică decît în cazul vitezelor care se apropie de cea a luminii. Numai cu viteze foarte mari poate fi verificată valabilitatea transformării Lorentz.
V. Dar mai este o dificultate. Potrivit mecanicii îmi pot imagina corpuri care au viteze chiar mai mari decit a luminii. Un corp care, faţă de un vapor în mişcare, se mişcă cu viteza luminii, faţă de ţărm se mişcă cu o viteză mai mare decît a luminii. Ce se va întîmpla cu bara care se contracta pînă la anihilare cînd viteza ei devenea egală cu cea a luminii ? Nu vedem cum ne-am putea reprezenta o lungime negativă pentru viteze mai mari decît a luminii.
M. Sarcasmul Dvs. este neîntemeiat. Potrivit teoriei relativităţii, un corp material nu poate avea o viteză mai mare decît cea a luminii. Viteza luminii constituie o limită superioară pentru vitezele tuturor corpurilor materiale. Dacă viteza unui corp este egală cu cea a lu-frninii faţă de vapor, ea va fi egală tot cu viteza luminii şi faţă de ţărm. Legea simplă de adunare şi scădere a vitezelor nu mai este valabilă sau mai precis este valabilă numai aproximativ, pentru viteze mici nu şi pentru cele care tind spre viteza luminii. Numărul care exprimă viteza luminii intervine în mod explicit în transformarea Lorentz şi joacă rolul de viteză limită, asemănător vitezei infinite in mecanica clasică. Această teorie mai generală nu contrazice transformarea clasică şi mecanica clasică. Dimpotrivă, vechile concepte rezultă ca un caz limită, cînd vitezele sînt mici. In noua teorie apare

limpede în care cazuri este valabilă fizica clasică, care sînt limitele ei. Ar fi tot atît de ridicol să aplicăm teoria relativităţii mişdării unui automobil, vapor teau tren, pe cit ar fi să ne slujim de o maşină de calculat unde ne este de ajuns o tablă a înmulţirii.

§ 28. RELATIVITATEA ŞI MECANICA

Teoria relativităţii s-a născut sub presiunea necesităţii, ca urmare a contrazicerilor grave şi adinei din sînul vechii teorii, care păreau fără ieşire. Superioritatea noii teorii rezidă în consecvenţa şi simplicitatea cu care înlătură toate aceste dificultăţi, bazîndu-se numai pe un: număr restrîns de ipoteze plauzibile.
Deşi teoria s-a născut din problema cîmpului, ea trebuie să îmbrăţişeze toate legile fizicii. In legătură cu a-ceasta, pare să se ivească încă o dificultate. Legile cîmpului şi legile mecanicii se deosebesc radical intre ele ca natură. Ecuaţiile cîmpului electromagnetic sînt invariante faţă de transformarea Lorentz, iar ecuaţiile mecanice faţă de transformarea clasică. Dar teoria relativităţii cere ca legile naturii să fie toate invariante faţă de transformarea Lorentz şi nu faţă de trasf or marea clasică. Aceasta ar trebui să reprezinte numai un caz particular al transformării Lorentz, limita spre care tinde ea cînd vitezele relative a două S.C.-uri sînt foarte mici. Dacă este aşa, mecanica clasică ar urma să fie modificată în aşa fel încît să devină conformă cu postulatul invariantei faţă de transformarea Lorentz. Sau, cu alte cuvinte, mecanica clasică încetînd să mai fie valabilă cînd vitezele-se apropie de cea a luminii, nu există decît un singur mod de a trece de le un S.C. la altul, anume transformarea Lorentz.
A fost uşor să se modifice mecanica clasică in aşa fel încît să nu contrazică nici teoria relativităţii nici materialul abundent strîns prin observaţii şi explicat de mecanica clasică. Vechea mecanică a rămas valabilă pentru viteze mici, reprezentînd cazul limită al noii mecanici

Ar fi interesant să trecem în revistă cîteva schimbări introduse în mecanica clasică de teoria relativităţii. Am putea poate astfel trage concluzii susceptibile de a fi confirmate sau infirmate de experienţă.

Să considerăm un corp cu o masă determinată care se mişcă în linie dreaptă şi asupra căruia acţionează o forţă exterioară, în direcţia mişcării lui. După cum ştim, forţa este proporţională cu variaţia vitezei. Adică, pentru a fi mai expliciţi, potrivit mecanicii clasice, este tot >una dacă un corp dat îşi măreşte viteza într-o secundă de la 100 la 101 metri pe secundă sau de la 100 km/s la 100 km/s plus un metru pe secundă, sau de la 300.000 km/s la 300.000 km/s plus un metru pe secundă. In toate aceste trei cazuri forţa necesară pentru a imprima corpului aceeaşi variaţie a vitezei, în acelaşi timp, este aceeaşi.

Confirmă teoria relativităţii această concluzie ? Nici decum ! Această lege este valabilă numai pentru viteze mici. Care este atunci, potrivit teoriei relativităţii, legea vitezelor mari care se apropie de aceea a luminii ? După teoria relativităţii, dacă viteza este mare, este nevoie de forţe extrem de mari pentru a o spori. Nu este acelaşi lucru să măreşti cu un metru pe secundă o viteză de ordinul a 100 de metri pe secundă sau o viteză care se apropie de cea a luminii. Cu cît viteza este mai aproape de aceea a luminii, cu atît creşterea ei este mai greu de realizat. O viteză egală cu cea a luminii nu mai poate fi mărită. Această modificare impusă de teoria relativităţii nu trebuie să ne surprindă. Viteza luminii reprezintă o limită superioară pentru toate vitezele. Nici o forţă finită, oricît ar fi ea de mare, nu poate face ca o viteză să întreacă această limită. Locul vechilor legi mecanice, care exprimau corelaţia dintre forţă şi variaţia de viteză, îl iâ o lege mai complicată. Din noul nostru punct de vedere, mecanica clasică apare simplă, deoarece în mai toate observaţiile avem de a face cu viteze mult mai mici decît cea a luminii.

Un corp în repaus are o masă determinată numită masa de repaus. Ştim, din mecanică, că orice corp se opune tendinţei de a i se schimba mişcarea, împotrivirea fiind «cu atit mai puternică cu cît masa lui este mai mare şi cu

atît mai slabă oi cît masa este mai mică. Dar, în teoria relativităţii intervine ceva mai mult. Corpul se opune mai puternic nu numai dacă masa lui de repaus este mai mare, ci şi dacă viteza lui este mai mare. Corpurile cu viteze apropiate de cea a luminii opun o rezistenţă foarte puternică forţelor exterioare. In mecanica clasică rezistenţa opusă de un corp dat era o entitate invariabilă, caracterizată exclusiv prin masa corpului. In teoria relativităţii ea depinde atît de masa de repaus cît şi de viteză. Cînd viteza tinde spre cea a luminii, rezistenţa devine infinit de mare.

Concluziile de mai sus ne dau posibilitatea de a supune teoria unei verificări experimentale. Proiectilele, a căror viteză se apropie de cea a luminii, se opun oare ac-ţiunii unei forţe exterioare aşa cum prevede teoria ? Deoarece afirmaţiile teoriei relativităţii, în problema aceasta, au un caracter cantitativ, vom putea confirma sau infirma teoria dacă putemi realiza proiectile cu o viteză apropiată de cea a luminii.

In adevăr, în natură găsim proiectile de asemenea viteze. Atomii substanţelor radioactive, de exemplu ai radiului, se comportă ca nişte baterii care lansează proiectile cu viteze uriaşe. Pentru a lămuri aceasta, ne vom mărgini să enunţăm una dintre cele mai importante concepţii ale fizicii şi chimiei moderne, fără a intra în amănunte, întreaga materie din Univers este constituită din puţine specii de particule elementare, asemenea clădirilor dintr-un oraş, care, deşi diferă ca mărime, construcţie şi arhitectonică, sînt construite toate, de la colibă la zgîrie-nori, din foarte puţine feluri diferite de cărămizi, aceleaşi pentru toate clădirile. La fel, toate elementele cunoscute ale lumii noastre materiale, de la hidrogen care este cel mai uşor pînă la uraniu care este cel mai greu sînt construite din aceleaşi feluri de cărămizi, adică din aceleaşi tipuri de particule elementare. Elementele cele mai grele, construcţiile cele mai complicate, sînt nestabile

x) Recent, un grup de savanţi americani a anunţat descoperirea elementului 102, al zecelea element sintetic. El se va numi nobelium, după numele Institutului Nobel din Stokholm. N. Red. E. T.

şi se dezintegrează sau, cum se spune, sînt radioactive. Unele din cărămizi, adică din particulele elementare din care sînt construiţi atomii radioactivi, sînt expulzate uneori cu o viteză foarte mare care se apropie de cea a luminii. Potrivit concepţiilor noastre actuale, confirmate de multe experienţe, atomul unui element, să zicem al ra-diului, este

un edificiu complex şi dezintegrarea radioactivă este unul din fenomenele cari arată că atomii sînt alcătuiţi din cărămizi mai simple, din particulele elementare.
Cu ajutorul unor experienţe foarte ingenioase şi complicate, putem stabili cum se opun aceste particule acţiunii forţelor exterioare. Experinţele arată că rezistenţa opusă de aceste particule depinde de viteză, în modul prezis de teoria relativităţii. In numeroasele cazuri, în care s-a putut pune în evidenţă o dependenţă de viteză a rezistenţei opuse, s-a constatat o concordanţă deplină între teorie şi experienţă. In acest exemplu regăsim esenţa activităţii creatoare în ştiinţă : prezicerea anumitor fapte de către teorie şi confirmarea lor de către experienţă.
Acest rezultat sugerează o altă generalizare importantă. Un corp în repaus are masă, dar nu are energie cinetică, adică energie de mişcare. Un corp in mişcare are atît masă cît şi energie cinetică. Dar el se opune variaţiei de viteză mai puternic decît corpul în repaus. Prin urmare, totul se petrece ca şi cum energia cinetică a corpului în mişcare i-ar mări împotrivirea. Dintre două corpuri cu aceeaşi masă de repaus, cel cu o energie cinetică mai mare se opune mai puternic acţiunii unei forţe exterioare.
Să ne imaginăm o cutie care conţine mingi, atît cutia cît şi mingile fiind în repaus în S.C.-u lnostru. Pentru a o pune în mişcare, pentru a-i mări viteza, este necesară o forţă. Dar, va mări această forţă viteza cu aceeaşi cantitate, în acelaşi timp, şi atunci cînd mingile s-ar agita în interiorul cutiei, asemenea moleculelor unui gaz, cu o viteză vecină de cea a luminii ? Nu, în cazul acesta ar fi necesară o forţă mai mare, din cauză că energia cinetică, mărită, a mingilor măreşte opunerea cutiei. Prin urmare,, energia, cel puţin cea cinetică, se opune mişcării în ace
Cîmp, relativitate
71
laşi fel ca masa ponderabilă. Se verifică aceasta pentru tcate felurile de energie ?
Teoria relativităţii deduce din ipotezele ei fundamentale un răspuns clar şi plauzibil la această întrebare, şi anume tot un răspuns cu caracter cantitativ ; orice energie se opune variaţiei mişcării ; orice energie se comportă caf materia ; o bucată de fier cîntăreşte mai mult cînd este încălzită la roşu decît cînd este rece ; o radiaţie solară care rătăceşte prin spaţiu conţine energie şi prin urmare are masă. Soarele şi toate stelele care radiază pierd din masa lor prin însuşi faptul că emit radiaţii. Această concluzie, cu caracter absolut general, este o cucerire importantă a teoriei relativităţii şi ea concordă cu toate faptele cu care a fost confruntată.
Fizica clasică a introdus două substanţe : materia şi energia. Prima avea greutate, cea de a doua era lipsită de greutate. In fizica clasică aveam două legi de conservare : una pentru materie, alta pentru energie. Ne-am întrebat mai înainte dacă fizica modernă menţine concepţia celor două substanţe şi cele două legi de conservare. Răspunsul este : „Nu". Potrivit teoriei relativităţii, intre masă şi energie nu este o deosebire esenţială ; energia are masă şi masa reprezintă energie. In loc de două legi de conservare avem una singură, a masei-energiei. In dezvoltarea ulterioară a fizicii, această nouă concepţie s-a verificat cu1 succes şi s-a dovedit foarte fecundă.
Cum se explică, deci, că faptul că energia are masă şi masa reprezintă energie, a rămas atîta timp în întuneric? Este oare greutatea unei bucăţi de fier calde mai mare decît a unei bucăţi reci ? Acum răspunsul la această întrebare este : „Da". Dar la pag. 37 el fusese : „Nu". Or, cele 120 pagini dintre cele două răspunsuri încă nu sînt de ajuns pentru a acoperi această contrazicere.
Dificultatea pe care o întîmpinăm aici este de aceeaşi natură cu altele întîlnite. Variaţia masei, prezisă de teoria relativităţii, este nemăsurabil de mică, şi, ca atare, nu poate fi pusă in evidenţă prin cîntărire directă, chiar cu balanţele cele mai sensibile. Dovada faptului că energia nu este lipsită de greutate poate fi totuşi făcută pe mai multe căi concludente, dar toate indirecte.
71
Evoluţia fizicii
Inexistenţa dovezilor imediate se datoreşte micimii raportului de transformare dintre materie şi energie. Comparată cu masa, energia este ca o monedă depreciată faţă de o valută forte. Un singur exemplu e de ajuns pentru a ilustra aceasta. Cantitatea de căldură capabilă să transforme în abur 30000 de tone de apă ar cîntări cam un gram ! Energia a fost considerată mult timp ca fiind lipsită de greutate, din cauză că masa pe care o reprezintă este extrem de mică.

Vechea energie-substanţă este cea de a doua victimă a teoriei relativităţii. Prima fusese mediul introdus pentru propagarea undelor de lumină.
Influenţa teoriei relativităţii se extinde nu numai asupra problemei din care ea s-a născut. Ea înlătură dificultăţile şi contrazicerile teoriei cîmpului. Ea formulează legi mecanice mai generale. Ea înlocuieşte două legi de conservare printr-una singură. Ea schimbă noţiunea noastră clasică de timp absolut. Valabilitatea ei nu se limitează la un singur domeniu al fizicii. Ea constituie un cadru general care cuprinde toate fenomenele naturii.

§ 29. COTINUUMUL SPAŢIU — TIMP

„Revoluţia Franceză a izbucnit la Paris la 14 iulie 1789". In această frază se precizează locul şi timpul unui eveniment. Celui ce aude pentru prima dată această afirmaţie, fără a şti ce înseamnă „Paris", i s-ar putea da următoare lămurire : Parisul este un oraş situat pe Pămîntul nostru, la 2° longitudine estică şi 49° latitudine nordică. Cele două numere ar caracteriza locul şi „14 iulie 1789" momentul cînd a avut loc evenimentul. In fizică, mult mai mult decît în istorie, specificarea exactă a locului şi a momentului cînd s-a produs un eveniment este de mare importanţă deoarece aceste date constituie baza unei descrieri cantitative.
Pentru simplicitate, pînă acum, am considerat numai mişcări rectilinii. Sistemul nostru de coordonate era o bară rigidă cu un reper iniţial, dar fără reper terminal. Să menţinem această restricţie. Să considerăm diferite puncte pe bară ; poziţia fiecăruia poate fi caracterizată printr-un

număr, prin coordonata punctului. Cind spunem că coordonata unui punct este, de exemplu, de 7,586 cm, înţelegem că distanţa lui măsurată de la originea barei este de 7,586 cm. Reciproc, dacă ni se dă un număr oarecare şi o unitate, putem oricînd să găsim un punct, situat pe bară^ care să corespundă acestui număr. Putem spune : fiecărui număr îi corespunde un punct anumit pe bară şi fiecărui punct îi corespunde un număr determinat. Faptul acesta matematicienii îl formulează astfel : toate punctele unei bare formează un continuum unidimensional. Fiind dat un punct oarecare pe bară, putem găsi un punct oricît de aproape vrem de el. Putem deci uni două puncte distincte de pe bară prin „paşi" oricît de mici dorim. Micimea aceasta arbitrară a „paşilor" prin care se pot uni puncte distanţate este caracteristica continuumului.
Să luăm un alt exemplu. Avem un plan sau dacă pre«* feraţi ceva mai concret, suprafaţa unei mese dreptunghiulare. Pentru a defini pozi- «-.
ţia unui punct pe această masă trebuie indicate două numere, nu unul singur ca pînă acum.
Cele două numere pot fi, de ____
exemplu, distanţele punctului faţă de două muchii perpendiculare ale mesei. Fiecărui punct j_j__
din plan îi corespunde o pe- Ăt%
reche de numere, nu unul singur ; reciproc, fiecărei perechi de numere îi corespunde un punct definit în plan. Cu alte cuvinte planul este un continuum bidimensional (fig. 60).
Fiind dat un punct oarecare în plan, putem găsi puncte oricît de aproape vrem de el. Prin urmare, două puncte separate printr-o distanţă pot fi unite printr-o curbă pe care o putem fracţiona în segmente oricît de mici vrem. Prin urmare, caracteristica continuumului bidimensional este tot micimea arbitrară a „paşilor" în care poate fi împărţită distanţa a două puncte, de data aceasta reprezentate fiecare prin două numere.
încă un exemplu. Să admitem că aţi adoptat drept S.C. camera Dvs. Aceasta înseamnă că vă propuneţi să

determinaţi toate poziţiile în raport cu pereţii rigizi ai camerei. Poziţia lămpii, dacă ea este în repaus, poate fi definită prin trei numere, două din ele reprezentînd distanţa ei faţă de doi pereţi perpendiculari, cel de-al treilea distanţa ei faţă de podea sau de plafon. Fiecărui punct al spaţiului îi corespund trei numere definite, şi reciproc, fiecărui grup de trei numere îi corespunde un punct definit din spaţiu. Aceasta se poate exprima prin fraza : spa-ţinl nostru este un continuum tridimensional (fig. 61).

Pentru a reveni la fizică trebuie să tratăm mişcări ale particulelor materiale. Pentru a observa şi prezice evenimente din natură, trebuie să luăm în considerare nu numai locul •ci şi timpul evenimentelor fizice. Să ne referim din nou la un exemplu foarte simplu. Să lăsăm să cadă dintr-un turn o piatră mică, care poate fi considerată ca o particulă. Să zicem că turnul are o înălţime de 80 de metri. încă de pe vremea lui Galileu, se putea prezice coordonata pietrei într-un moment oarecare de la începerea căderii ei. Dăm mai jos un „orar" care indică poziţiile pietrei după 0, 1, 2, 3 şi 4 secunde.

Timpul, în secunde	0	1	2	3	4
înălţimea, în metri	80	75	60	35	0

Fiind dat un punct oarecare /al spaţiului, se pot găsi puncte ori-cît de apropiate vrem de el. Şi caracteristica continuumului tridimensional este tot micimea arbitrară a „paşilor" cu care pot fi 'u-nite puncte distanţate, reprezentate fiecare prin trei numere.
Fig. 61
Dar, toate acestea încă nu înseamnă fizică.
Cîmp, relativitate
73
El conţine cinci evenimente, fiecare dintre ele fiind reprezentat printr-o pereche de numere, timpul şi coordonata spaţială corespunzătoare. Primul eveniment este lansarea pietrei de la înălţimea de 80 de metri, la secunda zero. Al doilea eveniment este coinciderea pietrei cu bara noastră rigidă (turnul) la 75 metri deasupra solului. El are loc după scurgerea primei secunde. Ultimul eveniment este coinciderea pietrei cu solul. Informaţiile deduse din „orarul" nostru le putem reprezenta şi în alt fel, figurînd cele cinci perechi de numere din „orar" ca cinci puncte pe un plan. Să adoptăm
întîi o scară de măsură : cele două segmente din figură reprezintă, unul distanţa de 20 metri, celălalt intervalul de o secundă (fig. 62).
Trasăm apoi două linii perpendiculare numind, de exemplu, pe cea orizontală axa timpului şi pe cea verti-
Metrt ii
>60
20 m
îs
Fig. 62
60
4tf
ZO
'-1-'-1-•-1-**r
0 12 3 4 5 Secunde Axa timoului Fig. 63.
cală axa spaţiului. Constatăm numaidecît că „orarul" nostru poate fi reprezentat prin cinci puncte in planul nostru spaţiu-timp.
Distanţele punctelor faţă de axa spaţială reprezintă coordonatele lor temporale care figurează în prima linie
11 — Evoluţia fizicii
73
Evoluţia fizicii
a „orarului" nostru, iar distanţele punctelor faţă de axa timpului reprezintă coordonatele lor spaţiale (fig. 63).
Unul şi acelaşi lucru este exprimat sub două forme diferite : prin „orar" şi prin puncte în plan. Fiecare din cele două reprezentări poate fi dedusă din cealaltă. Alegerea uneia din aceste două reprezentări este o chestiune numai de gust, căci în fond ele sînt echivalente.
Metri
60
Secunde
Âxd timpului
Fig. 64
Să facem un pas mai departe. Să ne imaginăm un „orar4* mai amănunţit care ne-ar da poziţia, nu din secundă în secundă, ci să zicem din sutime în sutime sau din miime în miime de secundă. Am avea atunci foarte multe puncte în planul nostru spaţiu-timp.

Continuind aşa, s-ar ajunge ca poziţia să fie indicată pentru fiecare moment, sau cum spun matematicienii, coordonata spaţială ar fi exprimată ca funcţie de timp ; atunci, şirul nostru de puncte s-ar transforma într-o linie continuă. Figura următoare nu dă o cunoaştere fragmentată ca mai înainte, ci cunoaşterea completă a mişcării (fig- 64).
în această reprezentare, mişcarea in lungul barei rigide (turnului), mişcarea în spaţiul unidimensional, este redată printr-o curbă într-un continuum bidimensional

spaţiu-timp. Fiecărui punct din continuumul nostru spaţiu-timp îi corespunde o pereche de numere dintre care, unul reprezintă timpul, celălalt coordonata spaţială. Invers, fiecărei perechi de numere care caracterizează un eveniment îi corespunde un punct bine definit în planul nostru spaţiu-timp. Două puncte vecine reprezintă două evenimente care-s-au produs în două locuri puţin depărtate unul de altul şi la două momente puţin diferite.
împotriva reprezentării noastre s-ar putea obiecta că nu prea are sens să reprezentăm o unitate de timp printr-un segment, să o combinăm în mod mecanic cu spaţiul, realizînd un continuum bidimensional din cele două continuumuri unidimensionale. Dar, atunci ar trebui să protestaţi, tot atît de energic, împotriva tuturor graficelor care reprezintă, de exemplu, variaţia temperaturii la New-York în cursul verii trecute, sau împotriva graficelor care reprezintă variaţia costului vieţii în ultimii ani, căci în toate aceste cazuri este folosită exact aceeaşi metodă. De exemplu, în graficul temperaturii, continuumul unidimensional al temperaturii este combinat cu continuumul unidimensional al timpului, dînd continuumul bidimensional temperatură-timp.
Să ne întoarcem la particula noastră lăsată să cadă din vîrful turnului cu înălţimea de 80 metri. Modul nostru de a reprezenta grafic mişcarea constituie o convenţie utilă, deoarece el precizează poziţia particulei în fiecare moment. Acum, fiindcă ştim cum se mişcă particula, să reprezentăm din nou mişcarea ei. Putem face aceasta în două moduri distincte.
Ne amintim reprezentarea în care particula îşi schimbă poziţia în timp, în spaţiul unidimensional. în această reprezentare mişcarea apare ca o succesiune de evenimente în continuumul spaţial unidimensional. In această imagine dinamică, în care poziţiile se schimbă în timp, timpul şi spaţiul nu se contopesc.
Putem însă reprezenta aceeaşi mişcare folosind şi alt procedeu. Considerînd curba care corespunde mişcării în continuumul bidimensional spaţiu-timp, obţinem o imagine statică a mişcării. Acum, mişcarea este reprezentată ca ceva care este, care există în continuumul bidimensional

spaţiu-timp şi nu ca ceva care evoluează în continuumul unidimensional spaţial. Ambele reprezentări sint absolut echivalente şi a prefera una sau alta este numai o chestiune de convenţie şi de gust.
Nimic din ceea ce s-a spus aici cu privire la cele două reprezentări nu are de a face cu teoria relativităţii. Ambele reprezentări pot fi folosite cu aceeaşi îndreptăţire ; dar fizica clasică favorizează reprezentarea dinamică con-cepînd mişcarea ca o succesiune de evenimente în spaţiu şi nu ca ceva existent în spaţiu-timp. Teoria relativităţii a schimbat acest punct de vedere. Ea este net în favoarea reprezentării statice, considerînd că această reprezentare a mişcării, ca ceva existent în spaţiu-timp, furnizează o imagine mai adecuată şi mai obiectivă a realităţii. Trebuie să mai răspundem la o întrebare. De ce aceste două imagini, echivalente din punct de vedere al fizicii clasice, nu sînt echivalente din punctul de vedere al teoriei relativităţii ?
Răspunsul va apare limpede dacă vom considera din nou două S.C.-uri care se mişcă uniform unul faţă de altul.
Potrivit fizicii clasice, doi observatori situaţi în două S.C.-uri în mişcare uniformă unul faţă de altul vor atribui unui eveniment dat coordonate spaţiale diferite dar aceeaşi coordonată temporală. Astfel, in exemplul nostru, atingerea solului de către particulă este caracterizată în S.C.-ul ales de noi prin coordonata temporală „4" şi prin coordonata spaţială „0". Potrivit mecanicii clasice, pentru un observator care se mişcă uniform faţă de S.C.-ul nostru, piatra va atinge Pămîntul tot după patru secunde. Dar un astfel de observator, raportînd distanţa la S.C.-ul lui, va atribui evenimentului ciocnire, în principiu,

altă coordonată spaţială, iar coordonata temporală va fi aceeaşi pentru el şi pentru toţi ceilalţi observatori care s-ar mişca uniform unul faţă de altul. Fizica clasică nu cunoaşte decît scurgerea de timp „absolut" pentru toţi observatorii. Pentru fiecare S.C, continuumul bidimensional poate fi despicat în două continuumuri unidimensionale : timp şi spaţiu. Din cauza caracterului „absolut"

al timpului în fizica clasică, tranziţia de la reprezentarea „statică4* la cea „dinamică** a mişcării are o semnificaţie obiectivă.
Dar am căzut de acord că transformarea clasică nu are aplicabilitate generală în fizică. Din punctul de vedere practic, ea se verifică pentru viteze mici, dar nu poate fi folosită pentru tratarea problemelor fundamentale ale fizicii.
Or, potrivit teoriei relativităţii, momentul ciocnirii pietrei cu Pământul nu va fi acelaşi pentru toţi observatorii. Coordonata temporală şi coordonata spaţială vor fi diferite în două S.C.-uri diferite şi variaţia coordonatei temporale va fi foarte pronunţată dacă viteza relativă a celor două S.C.-uri este foarte apropiată de cea a luminii. Continuumul bidimensional nu poate fi deci despicat în două continuumuri unidimensionale, ca în fizica clasică. Nu ne este îngăduit să tratăm separat spaţiul şi separat timpul, cînd determinăm coordonatele spaţiale şi temporale în alt S.C. Din punctul de vedere al teoriei relativităţii., despicarea continuumului bidimensional în două continuumuri unidimesionale apare ca un procedeu arbitrar, fără o semnificaţie obiectivă.
Tot ce am spus pentru cazul mişcării rectilinii poate fi uşor extins asupra mişcării pe o curbă oarecare. In adevăr, pentru a descrie evenimentele din natură este nevoie de patru numere şi nu numai de două. Spaţiul nostru fizic, conceput cu ajutorul obiectelor şi al mişcării lor, are trei dimensiuni şi poziţiile sînt caracterizate prin trei numere. Momentul unui eveniment este cel de-al patrulea număr. Fiecărui eveniment îi corespund deci patru numere distincte şi fiecărui grup de patru numere îi corespunde un eveniment determinat. Prin urmare : lumea evenimentelor formează un continuum cuadridimensional. Nu este nimic misterios în cele de mai sus şi ultima propoziţie este valabilă deopotrivă pentru fizica clasică şi pentru teoria relativităţii. Insă, de îndată ce se consideră două S.C.-uri în mişcare relativă unul faţă de altul, apare din nou diferenţa celor două concepţii. Să ne referim din nou la camera în mişcare ; cei doi observatori, cel din in

terior şi cel din exterior, determină coordonatele spaţiale şi temporale ale aceluiaşi eveniment.
Fizicianul clasic despică din nou continuumul cuadri-dimensional în spaţiul tridimensional şi în continuumul unidimensional al timpului. Vechiul fizician se rezuma la transformarea spaţiului, deoarece timpul este absolut pentru el. El găseşte despicarea continuumului cuadridimen-sional al Universului în spaţiu şi timp firească şi comodă. Dar, potrivit teoriei relativităţii, prin trecerea de la un S.C. la altul se transformă şi timpul nu numai spaţiul ; transformarea lui Lorentz ţine seamă de proprietăţile de transformare ale continuumului cuadridimensional spaţiu-timp al Universului nostru cuadridimensional al evenimentelor. Lumea evenimentelor poate fi descrisă dinamic prin Imaginii care variază în timp, proiectate in spaţiul tridimensional. Ea poate fi însă descrisă şi prin reprezentări statice făcute în continuumul cuadridimensional spaţiu-timp. Din punctul de vedere al fizicii clasice, cele două imagini, cea dinamică şi cea statică, sînt echivalente. Dar din punctul de vede al teoriei relativităţii, reprezentarea statică este mai adecuată şi mai obiectivă. Şi în teoria relativităţii putem folosi reprezentarea dinamică, dacă o preferăm. Nu trebuie să pierdem din vedere însă că această despicare în timp şi spaţiu nu are o semnificaţie obiectivă, căci timpul nu mai este absolut, în paginile următoare, vom continua să folosim limbajul dinamic şi nu pe cel static, avînd însă prezente în minte limitele lui.

§ 30. RELATIVITATEA GENERALĂ

Mai rămîne de lămurit un punct. Una din chestiunile cele mai fundamentale ftu a fost încă pusă : există un sistem inerţial ? Am învăţat despre invarianta legilor naturii faţă de transformarea lui Lorentz şi despre valabilitatea lor în toate sistemele inerţiale în mişcare uniformă unul faţă de altul. Avem legi, dar nu cunoaştem reperul la care trebuie să le raportăm.

Pentru a sezisa bine această dificultate să-i luăm fizicianului clasic un interview sub forma cîtorva întrebări simple :
„Ce este un sistem inerţial" ?
„Un S.C. în care legile mecanicii sint valabile. Un corp asupra căruia nu acţionează forţe exterioare se mişcă uniform într-un astfel de S.C. Această proprietate ne oferă posibilitatea de a deosebi un S.C. inerţial de unul neiner-ţiar.
„Dar ce înseamnă să spunem că nu acţionează forţe asupra unui corp ?"
„înseamnă pur şi simplu că el se mişcă uniform într-un S.C. inerţial".
Am putea repeta întrebarea : „Ce este un S.C. inerţial ?" Dar cum există puţine şanse de a obţine alt răspuns decît cel de mai sus, să încercăm să dobînidim informaţii concrete sehimbînd întrebarea.
„Un S.C. solidar cu Pămîntul este inerţial?"
„Nu, fiindcă pe Pămînt legile mecanicii nu sînt riguros valabile din cauza rotaţiei lui. Pentru multe probleme poate fi considerat inerţial un S.C. legat solidar cu Soarele, dar cînd vorbim de rotaţia Soarelui se înţelege că nici un S.C legat de el nu poate fi considerat riguros inerţial."
„Atunci ce este, în concret, S.C.-ul Dvs. inerţial şi ce trebuie presupus cu privire la starea lui de mişcare?"
„El este numai o ficţiune utilă şi nu am idee cum poate fi realizat. Dacă mi-ar sta în putinţă să mă îndepărtez de orice corp material suficient pentru a mă elibera de toate acţiunile exterioare, atunci S.C.-ul meu ar deveni inerţial."
„Dar ce înţelegeţi prin aceea că un S.C este eliberat de toate acţiunile exterioare ?"
„înţeleg că el este inerţial."
Am ajuns din nou la întrebarea de la care am pornit !
Interviewul nostru pune în lumină o gravă dificultate a fizicii clasice. Avem legi, dar nu ştim la ce reper să le raportăm ; ca atare, tot edificiul fizicii pare a fi clădit pe 'nisip.
La aceeaşi dificultate ajungem venind din cu totul altă direcţie. Să ne imaginăm că tot Universul ar consta dintr-un

singur corp, care ar constitui S.C.-ul nostru. Să admitem *că acest corp începe să se rotească. Potrivit mecanicii clasice, legile fizice pentru un corp care se roteşte vor fi diferite de cele pentru un corp. care nu se roteşte. Dacă principiul inerţiei este valabil în primul caz, el nu mai este valabil în cazul al doilea. Dar aceasta sună foarte suspect. Ne este oare îngăduit să considerăm mişcarea unui singur corp în întregul Univers? Prin mişcarea unui corp înţelegem întotdeauna schimbarea poziţiei sale faţă de un al doilea corp. De aceea, a vorbi despre mişcarea unui singur corp contravine bunului simţ. Mecanica clasică şi judecata sănătoasă se contrazic însă vehement aici. Reţeta lui Newton este : dacă principiul inerţiei este valabil, atunci S.C.-ul este fie în repaus, fie în mişcare uniformă ; dacă prncipul inerţiei nu este valabil, atunci corpul este în mişcare neuniformă. De unde, pronunţarea verdictului : cutare S.C. este în repaus, respectiv în mişcare, dacă toate legile fizice sînt sau nu sînt aplicabile în S. C.-ul dat.
Să considerăm acum, pentru precizare, două corpuri : Pămintui şi Soarele. Mişcarea pe care o observăm este tot relativă; în principiu ea poate fi descrisă legînd S.C.-ul fie de Pămînt, fie de Soare. Din punctul acesta de vedere, marea realizare a lui Copernic consistă tocmai în transportarea S.C.-ului de pe Pămînt în Soare. Totuşi, cum mişcarea este relativă şi cum în principiu orice sistem de referinţă poate fi folosit la fel de bine, favorizarea unuia din cele două S.C.-uri pare a nu avea nici o îndreptăţire.
Dar, şi în această problemă, intervine fizica pentru a ne corecta punctul de vedere bazat pe bunul simţ ; S.C.-ul legat de Soare se apropie in măsură mai mare de un sistem inerţial decît cel legat de Pămînt. Urmează că este preferabil să se raporteze legile fizicii la S.C.-ul lui Copernic decît la cel al lui Ptolemeu. Importanţa uriaşei descoperiri a lui Copernic nu poate fi preţuită decît din punctul de vedere fizic. Ea ilustrează marele avantaj al folosirii unui S.C. legat solidar cu Soarele pentru descrierea mişcării planetelor.
în fizica clasică nu există mişcare uniformă absolută : dacă două S.C.-uri se mişcă uniform unul faţă de altuU

16^
atunci n-are nici un sens să declarăm : „acest S.C. este în repaus şi celălalt în mişcare". Dar, dacă două S.C.-uri se mişcă neuniform unul faţă de altul, atunci există un temei pentru a afirma : „acest corp se mişcă şi celălalt este în repaus (sau se mişcă uniform)**. Mişcarea absolută are un înţeles foarte bine definit. Prin urmare, în problema aceasta, intre bunul simţ şi fizica clasică se deschide o prăpastie. Dificultăţile menţionate, cea a sistemului inerţial şi cea a mişcării absolute sînt strîns legate una de alta : posibilitatea mişcării absolute decurge din ideea existenţei unui sistem inerţial, în care legile naturii sînt valabile.
S-ar părea că nu există nici o ieşire din aceste dificultăţi, dat fiind că nici o teorie fizică nu le poate evita. Rădăcina lor rezidă în valabilitatea legilor naturii pentru o clasă specială de S.C.-uri, cele inerţiale. Posibilitatea învingerii acestei dificultăţi depinde de răspunsul pe care-1 vom da întrebării următoare : Putem formula legi fizice care să fie valabile pentru toate S.C.-urile, nu numai pentru cele care se mişcă uniform, ci şi pentru cele care se mişcă oricum unul faţă de altul? Dacă acest lucru ar fi cu putinţă, atunci dificultăţile noastre ar dispare. Am putea atunci să aplicăm legile naturii oricărui S.C Disputa, atît de îndîrjită la începuturile ştiinţei, între concepţia lur Ptolemeu şi cea a lui Copernic, ar deveni fără obiect. Fiecare dintre cele două S.C-uri ar putea fi folosit cu aceeaşi îndreptăţire. Cele două afirmaţii „Soarele este în repaus şi Pămîntul se mişcă** sau „Soarele se mişcă şi Pămîntul este in repaus** ar constitui pur şi simplu două convenţii diferite, corespunzînd la două S.C.-uri diferite.
Putem construi o fizică cu adevărat relativistă, valabilă^ în orice S.C. ? O fizică în care să nu existe loc pentru mişcarea absolută, ci numai) pentru cea relativă ? Lucrul acesta este posibil cu adevărat !
O indicaţie, deşi foarte vagă, cu privire la sensul în care trebuie construită noua fizică, avem : o fizică cu adevărat relativistă trebuie să se aplice la orice S.C. şi, prin urmare, în particular şi celor inerţiale. In aceste S.C.-uri legile ne sînt cunoscute. La ele trebuie să se reducă, în cazul particular al sistemului inerţial, noile legi generale valabile pentru toate S.C.-urile.
£77
Evoluţia fizicii
Problema formulării legilor fizice pentru orice S.C. a fost rezolvată de aşa-numita teorie a relativităţii generale. Teoria anterioară, care se aplică numai sistemelor inerţiale, se numeşte teoria relativităţii restrînse (speciale). Cele două teorii, bineînţeles nu se pot contrazice, deoarece trebuie să includem vechile legi ale teoriei relativităţii restrînse în legile generale pentru un sistem neinerţial. Dar exact după cum S.C.-ul inerţial era mai înainte singurul pentru care se formulaseră legile fizice, acum el va constitui un caz particular, cazul limită, deoarece acum sînt permise orice S.C, oricum s-ar mişca ele unul faţă de altul.
Acesta este programul teoriei relativităţii generale. Dar, în schiţarea modului în care a fost el adus la îndeplinire, va trebui să fim mai vagi chiar decît pînă acum. Noi greutăţi ivite în dezvoltarea ştiinţei obligă teoria noastră să devină din ce în ce mai abstractă. Ne aşteaptă peripeţii imprevizibile. Ţinta noastră finală rămîne aceeaşi: înţelegerea mai adîncă a realităţii. Lanţului logic care leagă teoria şi observaţia i se adaugă noi verigi. Pentru a curăţa de ipoteze nenecesare şi artificiale calea care duce de la teorie la experienţă, pentru a cuprinde un domeniu tot mai întins de fapte, trebuie să dăm lanţului o lungime din ce in ce mai mare. Cu cît ipotezele devin mai simple şi mai fundamentale, cu atît se complică în schimb aparatul matematic, care intervine în raţionamente ; calea care duce de la teorie la observaţie devine mai lungă, mai subtilă, mai întortochiată. Oricît ar părea de paradoxal, fizica modernă este mai simplă decît cea veche, şi tocmai de aceea pare mai grea şi mai complicată. Insă, cu cît imaginea pe care ne-o facem despre lumea exterioară este mai simplă, cu cît îmbrăţişează mai multe fapte, cu atît ea oglindeşte mai puternic în mintea noastră armonia Universului.
Noua noastră idee este simplă : să construim o fizică valabilă pentru orice S.C Traducerea ei în fapt creează însă complicaţii formale şi ne constrînge să folosim un aparat matematic diferit de cel folosit pînă acum în fizică. In cele ce urmează, vom arăta numai legătura dintre înfăptuirea acestui program şi două probleme principale : gravitaţia şi geometria.
Cîmp, relativitate

§31. IN EXTERIORUL ŞI IN INTERIORUL UNUI ASCENSOR

Legea inerţiei marchează primul mare progres in fizică ; de fapt. ea înseamnă începutul fizicii. Ea a fost obţinută din reflexiunea asupra unei experienţe idealizate a mişcării perpetue a unui corp fără frecare şi fără forţe exterioare. Acest exemplu şi multe altele care i-au urmat ne-au permis să sezisăm importanţa experienţelor idealizate, concepute din reflexiune. Vom discuta acum tot nişte experienţe idealizate. Deşi ne vor părea cu totul fantastice, ele ne vor ajuta, totuşi, să înţelegem din relativitate atît cît ne îngăduie metodele noastre simple.

Am făcut apel, în repetate rînduri, la experienţe idealizate în care intervenea o cameră in mişcare uniformă. De astă dată vom examina cazul unui ascensor în cădere liberă.

Să ne imaginăm un ascensor mare în vîrful unui zgîrie-nori care să întreacă în înălţime pe toţi ceilalţi. Să presupunem că se rupe brusc cablul de susţinere şi ascensorul cade liber spre Pămînt, iar in tot cursul căderii nişte observatori efectuează experienţe în interiorul ascensorului. Pentru descrierea lor nu este necesar să luăm în considerare rezistenţa aerului sau frecarea, căci în condiţiile noastre idealizate putem să nu ţnem seamă de existenţa lor. Unul din observatori scoate o batistă şi ceasornicul din buzunar şi le lasă să cadă. Ce se va întîmplă cu cele două corpuri ? Pentru observatorul de afară care priveşte prin geamul ascensorului, atît batista cît şi ceasul cad spre Pămînt, absolut la fel, cu aceeaşi acceleraţie. Ne amintim că acceleraţia corpurilor care cad este cu totul independentă de masa lor şi că aceasta a fost faptul care a! dezvăluit egalitatea dintre masa gravifică şi cea inertă (pag. 33). Ne amintim de asemenea, că, din punctul de vedere al mecanicii clasice, egalitatea celor două mase apăruse ca un fapt cu totul accidental şi care nu juca nici un rol in structura ei. Dimpotrivă, în cele ce urmează, această egalitate, oglindită în egalitatea acceleraţiilor tuturor corpurilor în cădere, este esenţială şi constituie baza întregii noastre argumentaţii.

Să revenim la batista şi la ceasornicul nostru în cădere;

pentru observatorul din exterior, ele cad amîndouă cu a-ceeaşi acceleraţie. Tot cu aceeaşi acceleraţie cad însă şi pereţii, podeaua şi tavanul ascensorului. De aceea, distanţa dintre cele două corpuri şi podea nu va varia. Pentru observatorul din interior, cele două corpuri nu se clintesc din locul unde le lasă el libere. Se prea poate ca observatorul din interior să nu bănuiască nimic de existenţa cîmpului gravitaţional, deoarece izvorul lui este exterior S.C.-ului său. El constată că în interiorul ascensorului nu se exercită nici o forţă asupra celor două corpuri, astfel că ele sînt în repaus întocmai ca şi cînd s-ar găsi într-un S.C. inerţial. Lucruri stranii se petrec în ascensorul nostru. Dacă observatorul împinge un corp într-o direcţie oarecare, în sus sau în jos, de exemplu, el se mişcă uniform necontenit, afară doar dacă nu se loveşte de podeaua sau de tavanul ascensorului. Pe scurt, pentru observatorul din interiorul ascensorului, legile mecanicii clasice sînt in vigoare. Toate corpurile se comportă în modul prevăzut de legea inerţiei. Intr-o singură privinţă se deosebeşte de S.C.-ul inerţial noul nostru S.C, solidar cu ascensorul în cădere liberă, într-un S.C. inerţial un corp o dată pus în mişcare, continuă să se mişte uniform la infinit dacă nu acţionează forţe asupra lui; S.C.-ul inerţial, aşa cum este el definit în fizica clasică, nu este limitat nici în spaţiu nici în timp. Alta este situaţia pentru observatorul din ascensorul nostru. Caracterul inerţial al S.C.-ului său este limitat în spaţiu şi în timp. Mai devreme sau mai tirziu unul din corpurile în mişcare se va lovi de pereţii ascensorului şi mişcarea uniformă va fi distrusă. Mai de vreme sau mai tîr-ziu se va izbi de Pămînt întregul ascensor suprimînd observatorii cu experienţele lor cu tot ; S.C.-ul acesta este numai o „ediţie de buzunar" a unui adevărat S.C. inerţial.

Caracterul local inerţial al S.C-ului este absolut esenţial. Dacă ascensorul nostru ipotetic s-ar întinde de la Polul Nord pînă la Ecuator, batista fiind lăsată să cadă în dreptul Polului Nord şi ceasornicul în dreptul Ecuatorului, atunci pentru observatorul din exterior, cele două corpuri nu ar mai avea aceeaşi acceleraţie. De asemenea, ele nu ar mai fi în repaus unul faţă de altul ; toată argumentaţia noastră ar cădea. Dimensiunile ascensorului trebuie să fie

limitate îndeajuns pentru ca acceleraţiile tuturor corpurilor din interiorul lui să poată fi considerate constante de observatorul exterior.
Cu această restricţie S.C-ul capătă un caracter inerţial pentru observatorul din interior. Sîntem în situaţia de a putea indica un S.C. în care sînt valabile toate legile fizicii, chiar dacă el este limitat în timp şi spaţiu. Dacă imaginăm un alt S.C, în mişcare uniformă faţă de cel în cădere liberă, de exemplu un alt ascensor, atunci aceste două S.C.-uri vor fi local inerţiale. Toate legile vor fi exact a-celeaşi în amîndouă. Trecerea de la unul la altul s-ar face în conformitate cti transformarea lui Lorentz.
Să vedem acum în ce mod descriu cei doi observatori, cel din exterior şi cel din interior, ce se petrece în interiorul ascensorului.
Observatorul din exterior, studiind mişcarea ascensorului şi a tuturor corpurilor din el, constată că aceste mişcări se fac în conformitate cu legea lui Newton a gravitaţiei. Pentru el mişcarea nu este uniformă, ci accelerată, ca urmare a acţiunii cîmpului gravitaţional al Pămîntului.
In schimb, o generaţie de fizicieni născuţi şi crescuţi în ascensor ar judeca cu totul altfel. Ei s-ar crede în posesia unui sistem inerţial şi ar raporta toate legile naturii la ascensorul lor, justificînd aceasta prin caracterul deosebit die simplu pe care îl au legile in S.C.-ul lor. Ei ar găsi absolut firesc să presupună că ascensorul lor este în repaus şi că S.C.-ul lor este un S.C inerţial. ,
Este imposibil să tranşăm divergenţa dintre cei doi observatori. Fiecare din ei ar putea revendica dreptul de a raporta toate evenimentele la sistemul său de coordonate, căci evenimentele pot fi descrise tot atît de corect în amîndouă.
Acest exemplu arată că descrierea consecventă a fenomenelor fizice în două S.C-uri diferite este posibilă, chiar atunci cînd ele nu se mişcă uniform unul faţă de altul. Dar, pentru descrierea aceasta trebuie să ne bazăm pe gravitaţie care constituie o „punte" de trecere de la un S.C la altul. Cîmpul gravitaţional există numai pentru observatorul din afară ; pentru observatorul din interior el nu există. Pentru observatorul din exterior ascensorul se

mişcă accelerat în cîmpul gravitaţional, pentru observatorul din interior ascensorul este în repaus şi cîmpul gravitaţional nu există. Dar cîmpul gravitaţional, „puntea" care face posibilă descrierea în ambele S.C.-uri, se reazemă pe un stîlp de nezdruncinat : echivalenţa dintre masa inertă şi cea gravifică. Fără acest fir conducător.
neluat în seamă de mecanica clasică, consideraţiile de faţă n-ar duce la nici un rezultat. Pentru a arăta aceasta, să analizăm o experienţă idealizată, puţin diferită. Să admitem că ne găsim in prezenţa unui S. C. inerţial, în care legea inerţiei este deci valabilă. Am descris ce se petrece în ascensorul i în repaus într-un astfel de S.C. inerţial. Să schimbăm acum desfăşurarea experienţei : o persoană din a-fară a legat ascensorul cu o frînghie şi îl trage cu o forţă constantă în direcţia indicată în fig. 65 ; cum se realizează în mod concret această acţiune nu are nici o importanţă. Intrucît legile mecanicii sînt valabile în S.C.-ul în discuţie, întregul ascensor capătă o acceleraţie constantă în direcţia înaintării lui. Să ascultăm din nou explicaţiile pe care ni le dau cei doi observatori cu privire la fenomenele ce se petrec în ascensor.
Observatorul din exterior : Din S.C.-ul meu inerţiaî constat că ascensorul se mişcă cu acceleraţie constantă, deoarce asupra lui acţionează o forţă constantă. Observatorii din interior dnt în mişcare absolută ; pentru ei legile mecanicii nu sînt valabile. Pentru ei corpurile asupra cărora nu acţionează forţe nu sînt în repaus. Un corp lăsat liber se loveşte în scurt timp de podeaua ascensorului fiindcă ascensorul se mişcă în sus, înspre corp ; aceasta se produce absolut la fel pentru un ceasornic şi pentru o batistă. Pentru mine este un spectacol bizar faptul că observatorul din ascensor este ca ţintuit de „podea", căci de îndată ce face o săritură podeaua îl ajunge din urmă.
Fig. 65

Observatorul din interior : Nu văd nici o raţiune pentru a considera că ascensorul meu este în mişcare absolută. Recunosc că S.C.-ul meu solidar cu ascensorul nu este cu adevărat inerţial, dar nu găsesc că aceasta ar avea ceva de a face cu mişcarea absolută. Ceasornicul meu, batista mea şi toate corpurile cad din cauză că întregul ascensor se

găseşte într-un cîmp gravitaţional. Eu înregistrez exact acelaşi tip de mişcare ca oamenii de pe Pămînt. Ei o explică foarte simplu prin acţiunea cîmpului gravitaţional. Nu văd, de ce n-aş interpreta la fel fenomenele.
Ambele descrieri, atît aceea a observatorului din exterior, cît şi aceea a observatorului din interior sînt perfect consecvente şi nu există nici un temei în virtutea căruia să considerăm pe una din ele ca fiind cea reală. Pentru redarea fenomenelor din ascensor este absolut indiferent dacă adoptăm punctul de vedere al observatorului din exterior : mişcare neuniformă şi absenţa cîmpului gravitaţional sau pe al observatorului din interior : repaus şi prezenţa cîmpului gravitaţional.
Observatorul din interior ar mai putea invoca posibilitatea ca ascensorul să fie in mişcare „absolută neuniformă". Dar o mişcare pe care simpla presupunere a acţiunii unui cîmp gravitaţional o poate desfiinţa nu poate revendica un caracter absolut.
Este posibilă o ieşire din ambiguitatea acestor două descrieri distincte şi o decizie în favoarea uneia din ele. Să considerăm o rază de lumină care traversează ascensorul pătrunzînd în direcţie orizontală printr-unul din pereţii laterali şi atingînd, după un timp foarte scurt, peretele opus. Să vedem cum va prezice drumul luminii fiecare din cei doi observatori.
Observatorul din exterior, convins că ascensorul are o« mişcare accelerată, va raţiona astfel : lumina pătrunde prin fereastră şi se îndreaptă orizontal, în linie dreaptă şi cu viteza constantă către peretele opus. Dar ascensorul se mişcă în sus, şi în timp ce lumina străbate distanţa dintre un perete şi celălalt, ascensorul îşi schimbă poziţia. De aceea, raza va întîlni peretele într-un punct care nu este

direct opus punctului pe unde a intrat, ci care este situat puţin mai jos (fig. 66). Diferenţa va fi foarte mică, dar ea totuşi există ; ca atare, raza de lumină nu străbate ascensorul după o linie draptă, ci după o linie uşor curbată. Diferenţa este datorită distanţei parcursă de ascensor în intervalul în care îl traversează raza de lumină.
Observatorul din interior, convins că -asupra tuturor obiectelor din ascensor acţionează un cîmp gravitaţional, va declara : în ascensor nu intervin mişcări accelerate, ci numai acţiunea cîmpului gravitaţional. O rază de lumină fiind fără greutate, nu va fi influenţată de cîmpul gravitaţional. Prin urmare, dacă este emisă în direcţie orizontală, ea va întîlni peretele, dimpotrivă, într-un punct exact opus celui prin care a Fig. 66 intrat.
Această discuţie pare a indica modalitatea de a discerne între cele două puncte de vedere opuse, căci în cazul de faţă fenomenele ar fi diferite pentru cei doi observatori. Dacă nici una din cele două explicaţii pe care le-am redat acum nu conţin nimic ilogic, atunci toată argumentaţia anterioară se dovedeşte a fi inconsistentă ; ar rezulta că nu toate fenomenele pot fi descrise în două moduri consecvente, cu şi fără cîmp gravitaţional.
Dar, din fericire, raţionamentul observatorului din interior conţine o eroare gravă, care salvează concluzia noastră precedentă. El a afirmat că „o rază de lumină fiind fără greutate nu va fi influenţată de cîmpul gravitaţional". Ei bine, lucrul acesta nu poate fi adevărat ! O rază de lumină transportă energie şi energia are masă. Or, fiecare masă inertă este atrasă de cîmpul gravitaţional căci masa inertă şi cea gravitaţională sînt echivalente. O rază de lumină se va curba în cîmpul gravitaţional întocmai ca un corp aruncat orizontal cu o viteză egală cu cea a luminii. Dacă observatorul din interior ar fi raţionat corect, ţinînd seama de curbarea razei de lumină în cîmpul gravitaţional,

atunci rezultatele lui ar fi fost identice cu ale observatorului din exterior.
Cîmpul gravitaţional, al Pămîntului, este evident prea slab pentru a curba o rază de lumină de ajuns ca să permită demonstrarea directă, experimentală, a acestei afirmaţii. Dar faimoasele experienţe efectuate în timpul eclipselor de Soare pun în evidenţă într-un mod concludent, deşi indirect, influenţa cîmpului gravitaţional asupra drumului unei raze de lumină.
Din aceste exemple rezultă că speranţa formulării unei fizici relativiste este bine întemeiată. Dar, pentru aceasta, trebuie să tranşăm mai întîi problema gravitaţiei.
Am văzut din exemplul ascensorului că există două descrieri consecvente. Putem presupune, sau nu, existenţa mişcării neuniforme. Cu ajutorul cîmpului gravitaţional pu-

tem elimina mişcarea „absolută" din exemplele noastre. Dar această posibilitate dezbracă mişcarea neuniformă de caracterul ei absolut. Cîmpul gravitaţional s-a dovedit apt să suprime cu desăvîrşire mişcarea absolută.
Stafiile mişcării absolute şi a S.C.-ului inerţial pot fi, în sfîrşit, izgonite din fizică ; construirea unei noi fizici relativiste este posibilă. Experienţele noastre idealizate arată cum se împleteşte problema teoriei relativităţii generale cu cea a gravitaţiei şi de ce este atît de esenţială pentru conexiunea lor, echivalenţa dintre masa inertă şi cea gravifică. Este limpede că soluţia dată problemei gravitaţionale de teoria relativităţii generale trebuie să fie diferită de cea a lui Newton. Legile gravitaţiei, la fel ca toate legile naturii, trebuie să fie formulate pentru orice S.C posibile, in vreme ce legile mecanicii clasice, aşa cum le formulase Newton, sînt valabile numai într-un S.C inerţial.

§ 32. GEOMETRIA ŞI EXPERIENŢA

Exemplul care va urma este chiar mai fantastic decît cel cu ascensorul în cădere. Trebuie să atacăm o nouă problemă : cea a legăturii dintre teoria relativităţii generale şi geometrie. Să începem cu descrierea unei lumi în care trăiesc numai fiinţe bidimensionale, spre deosebire de lu-

mea noastră, în care trăiesc fiinţe tridimensionale. Cinematograful ne-a familiarizat cu făpturile bidimensionale care evoluează pe un ecran bidimensional. Să admitem acum că aceste umbre, adică figurile de pe ecran, ar exista in realitate, că ar avea capacitatea de a gîndi, că şi-ar crea ştiinţa lor proprie ; pentru ele spaţiul geometric ar fi reprezentat de un ecran bidimensional. Aceste fiinţe ar fi incapabile să-şi imagineze în mod corect un spaţiu tridimensional după cum sintem noi incapabili să ne imaginăm o lume cu patru dimensiuni. Ele ar putea curba o linie dreaptă, ele ar şti ce este un cerc dar nu ar fi în stare să construiască o sferă, deoarece aceasta ar însemna să iasă afară din ecranul lor bidimensional. Noi sîntem într-o situaţie asemănătoare. Sîntem capabili să abatem şi să încovoiem linii şi suprafeţe, dar nu ne putem reprezenta un spaţiu tridimensional deviat şi curbat.
Trăind, gîndind şi experimentînd, în cele din urmă» umbrele noastre vor ajunge să stăpînească eventual geometria euclidiană bidimensională. Ele vor putea atunci dovedi de exemplu că suma unghiurilor unui triunghi este de 180°. De asemenea, ele vor putea construi două cercuri concentrice, unul foarte mic, altul foarte mare. Vor putea stabili că raportul dintre circumferinţele celor două cercuri este egal cu raportul razelor lor, rezultat de asemenea caracteristic pentru geometria euclidiană. Dacă ecranul ar fi infinit de mare, aceste umbre ar ajunge la concluzia că o dată pornite intr-o călătorie drept înainte nu s-ar mai întoarce niciodată la punctul lor de plecare.
Să ne imaginăm acum că s-ar schimba condiţiile de viaţă ale acestor fiinţe bidimensionale : să presupunem că cineva din exterior, din „a treia dimensiune** le-ar transporta de pe ecran pe suprafaţa unei sfere cu o rază foarte mare. Dacă umbrele noastre sînt foarte mici faţă de întreaga suprafaţă, dacă ele nu dispun de nici un mijloc de comunicaţie la distanţă şi dacă nu se pot deplasa la mare depărtare, atunci ele nu vor sezisa schimbarea intervenită. In triunghiuri mici suma unghiurilor va fi tot de 180°. Două cercuri concentrice mici vor avea raportul razelor egal cu al circumferinţelor. O călătorie în

linie dreaptă nu le-ar readuce niciodată la punctul lor de plecare.
Dar să admitem că, cu timpul, aceste umbre şi-ar dezvolta cunoştinţele teoretice şi tehnice, că ar inventa mijloace de comunicaţie permiţîndu-le să străbată rapid mari distanţe. Ele vor constata atunci că pornind într-o călătorie drept înainte, în cele din urmă, s-ar întoarce la punctul lor de plecare. „Drept înainte" însemnează de-a lungul unui cerc mare al sferei. Ele ar constata, de asemenea, că raportul circumferinţelor a două cercuri concentrice nu este egal cu raportul razelor lor, dacă una din raze este mică iar cealaltă foarte mare.
Dacă fiinţele noastre bidimensionale sînt conservatoare, dacă au învăţat geometria euclidiană de generaţii întregi pe vremea cînd nu puteau călători în depărtări şi cînd geometria lor se dovedea conformă cu faptele observate, ele vor face toate eforturile

posibile pentru a-i rămîne credincioase, chiar împotriva evidenţei măsurărilor făcute de ele. Vor încerca să facă responsabilă fizica de aceste dezacorduri. Vor încerca să caute diferite motive de ordin fizic, de exemplu, diferenţele de temperatură care deformează liniile şi cauzează deviaţia de la geometria lui Euclid, dar mai curînd sau mai tîrziu vor găsi că există o cale mult mai logică şi mai convingătoare pentru explicarea acestor fapte. In cele din urmă, ele vor înţelege că lumea lor este o lume finită, guvernată de principii geometrice diferite de cele pe care le învăţaseră, că, în ciuda incapacităţii lor ăe a şi-o imagina, lumea lor este suprafaţa bidimensională a unei sfere. In curînd ele îşi vor însuşi noi principii de geometrie care, deşi diferite de cele euclidiene, vor putea fi totuşi formulate — pentru lumea lor bidimensională — tot atît de consecvent şi de logic. Noua generaţie, acomodată cu geometria sferei, va găsi vechea geometrie euclidiană mai complicată şi mai artificială, deoarece ea nu concordă cu observaţiile.

Să ne întoarcem la fiinţele tridimensionale ale lumii noastre.

Ce se înţelege prin afirmaţia că spaţiul nostru tridimensional are un caracter euclidian ? Sensul ei este că toate propoziţiile, demonstrate logic, ale geometriei lui

Euclid pot fi confirmate prin experienţe reale. Din corpuri rigide sau raze de lumină putem construi obiecte care corespund obiectelor idealizate ale geometriei euclidiene. Muchia unei rigle sau o rază de lumină corespund dreptei ; suma unghiurilor unui triunghi construit din bare rigide subţiri este de 180°. Raportul razelor a două cercuri concentrice, construite din sîrmă subţire nedeformabilă, este egal cu cel al circumferinţelor lor. Astfel interpretată, geometria euclidiană constituie un capitol al fizicii, chiar foarte simplu.

Dar ne putem imagina că s-au găsit totuşi şi diferenţe ; de exemplu, că suma unghiurilor unui triunghi mare construit din bare, pe care am fi avut toate motivele să le considerăm rigide, nu este de 180°. Cum sîntem ferm convinşi de posibilitatea reprezentării concrete a obiectelor geometriei euclidiene prin corpuri rigide, am atribui, probabil, unei forţe fizice această comportare anormală, neprevăzută, a barelor noastre. Am încerca să stabilim natura fizică a acestei forţe precum şi influenţa ei asupra altor fenomene. Pentru a salya geometria euclidiană am învinui obiectele că nu sînt perfect rigide, că nu corespund deci exact obiectelor geometriei euclidiene. Am încerca să stabilim o reprezentare mai corectă a corpurilor care să se comporte potrivit prevederilor geometriei euclidiene. Dacă totuşi nu am reuşi să armonizăm geometria lui Euclid şi fizica într-o reprezentare simplă şi consecventă, am fi nevoiţi să părăsim ideea că spaţiul nostru este euclidian şi să căutăm o imagine a realităţii bazată pe presupuneri mai generale asupra caracterului geometric al spaţiului nostru.

Necesitatea unei astfel de reprezentări poate fi ilustrată printr-o experienţă idealizată care să ne arate că o fizică relativistă reală nu se poate baza pe geometria euclidiană. Argumentarea noastră va utiliza rezultatele obţinute anterior referitoare la S.C.-urile inerţiale şi teoria relativităţii restrînse.

Să ne reprezentăm un disc mare pe care sînt trasate două cercuri concentrice, unul foarte mic, celălalt foarte mare (fig/ 67). Să admitem că discul pe care se află un observator interior se roteşte foarte repede faţă de un

observator exterior al cărui S.C. este inerţial. Observatorul din exterior va trasa în S.C.-ul său inerţial aceleaşi două cercuri, unul mic şi unul mare, in repaus faţă de S.C.-ul său, dar coincizînd cu cercurile de pe discul' care se roteşte. Geometria euclidiană este valabilă în S.C.-ul său deoarece este inerţial, astfel că observatorul exterior va găsi raportul circumferinţelor egal cu cel al razelor. Care este situaţia observatorului de pe disc? Din punctul de vedere al fizicii clasice precum şi al teoriei relativităţii restrînse, S. C.-ul lui este interzis. Dacă vrem ca să formulăm din nou legile fizice, astfel încît ele să fie valabile în orice S.C, atunci trebuie să considerăm S.C.-ul observatorului de pe disc tot atît de legitim ca şi acela al observatorului din exterior. Vom urmări din exterior observatorul interior în operaţiile de măsurare a circumferinţelor şi a razelor pe discul în rotaţie. El foloseşte aceeaşi mică riglă ca şi cel din exterior. „Aceeaşi" însemnîd fie efectiv aceeaşi riglă, primită de la observatorul din exterior, fie una din alte două rigle care au aceeaşi lungime atunci cînd sînt în repaus în raport cu un S.C.

Să presupunem că observatorul de pe disc îşi începe măsurătorile cu raza şi circumferinţa cercului mic. Rezultatele obţinute de el vor coincide cu cele ale observatorului din exterior. Axul în jurul căruia se roteşte discul trece prin centrul cercului. Părţile discului vecine cu centrul vor avea viteze foarte mici. Cu condiţia ca cercul să fie deajuns de mic, putem aplica deci liniştiţi mecanica clasică ignorînd teoria relativităţii restrînse. Aceasta înseamnă că rigla va avea aceeaşi lungime, atît pentru ob

servatorul din exterior cît şi pentru cel din interior ; prin urmare, rezultatele primelor două măsurători vor fi aceleaşi pentru amîndoi. Acum observatorul de pe disc măsoară raza cercului mare. Aplicată pe rază, rigla este în mişcare faţă de observatorul din exterior. Cu toate acestea ea nu se contractă, avînd aceeaşi lungime pentru amîndoi observatorii, deoarece mişcarea se face perpendicular pe direcţia ei. Aşadar, trei măsurători vor da acelaşi rezultat pentru amîndoi observatorii : ale celor două raze şi a circumferinţei cercului mic. Situaţia se schimbă însă pentru cea de a patra măsurătoare. Lungimea circumferinţei mari va fi diferită pentru cei doi observatori. Aplicată pe circumferinţă, deci situată pe direcţia mişcării, rigla va apărea observatorului din exterior contractată in comparaţie cu rigla lui din repaus. Pe cercul exterior viteza fiind mult mai mare decît pe cel interior, contracţia nu mai poate fi neglijată. De aceea, apli-cînd rezultatele teoriei relativităţii restrînse, ajungem la concluzia că lungimea circumferinţei mari va fi diferită pentru cei doi observatori. Deoarece una din cele patru lungimi măsurate de cei doi observatori nu are aceeaşi valoare pentru amîndoi, raportul celor două raze nu va putea fi egal cu raportul celor două circumferinţe pentru observatorul din interior. Cu alte cuvinte, observatorul de pe disc va constata că geometria euclidiană nu este valabilă în S.C.-ul său.

După ce a obţinut acest rezultat, observatorul de pe disc ar putea declara că nu admite S.C.-urile în care geometria euclidiană nu este valabilă. Prăbuşirea geometriei euclidiene s-ar datori rotaţiei absolute, faptului că S.C.-ul său este rău şi interzis. Argumentînd în felul acesta, el respinge însă ideea fundamentală a teoriei relativităţii generale. Dar dacă vrem să suprimăm mişcarea absolută şi să menţinem ideea teoriei relativităţii generale, atunci trebuie să construim fizica pe baza unei geometrii mai generale decît cea euclidiană. O dată ce am admis că toate S.C.-urile sînt permise, nu există nici un mijloc de a ne sustrage acestei concluzii.

Schimbările determinate de teoria relativităţii generale nu se pot însă mărgini numai la spaţiu. In teoria re

îativităţii restrinse avem ceasornice în repaus în fiecare S.C, cu acelaşi ritm şi sincronizate, adică indicînd simultan acelaşi timp. Ce se întîmplă cu un ceasornic într-un S.C. neinerţial ? Experienţa idealizată cu discul ne va folosi şi acum. Observatorul exterior are în S.C.-ul său inerţial ceasornice mergînd toate în acelaşi ritm şi perfect sincronizate. Observatorul din interior ia două ceasornice de acelaşi tip şi le aşază unul pe cercul mic interior, celălalt pe cercul exterior. Ceasornicul de pe cercul interior are o viteză foarte mică faţă de observatorul din exterior. Putem deci considera că ritmul lui va fi acelaşi cu cel al ceasornicului exterior. Dimpotrivă, ceasornicul de pe cercul mare are o viteză considerabilă, prin urmare îşi schimbă ritmul faţă de ceasornicele observatorului exterior şi deci faţă de ceasornicul situat pe cercul mic. Aşadar, cele două ceasornice care se rotesc vor avea ritmuri diferite şi, aplicînd rezultatele teoriei relativităţii restrînse, constatăm din nou că in S.C.-ul în rotaţie nu putem face aranjamente asemănătoare cu cele din S.C.-ul inerţial.

Pentru a arăta limpede ce concluzii decurg din experienţa aceasta şi din cea precedentă, să reproducem din nou un dialog între vechiul fizician V, adept al fizicii clasice, şi fizicianul modern M, înarmat cu cunoaşterea teoriei relativităţii generale, V, fiind observatorul din exterior al cărui S.C. este inerţial, iar M, observatorul de pe discul care se roteşte.

V. In S.C.-ul Dvs. geometria euclidiană nu este valabilă. Am urmărit măsurătorile Dvs. şi sînt de acord că în S.C.-ul Dvs. raportul a două circumferinţe nu este egal cu raportul razelor respective. Aceasta denotă că S.C.-ul Dvs. este un S.C. interzis. S.C.-ul meu are însă un caracter inerţial, ca atare eu pot aplica liniştit geometria euclidiană. Discul Dvs.

este în mişcare absolută, prin urmare, din punctul de vedere al fizicii clasice, constituie un S.C. interzis în care legile mecanicii nu sînt valabile.
M. Nu vreau să ştiu de mişcarea absolută ; S.C.-ul meu este exact la fel de bun ca al Dvs. Ceea ce am observat eu a fost rotaţia Dvs. faţă de discul meu. Nimeni

nu mă poate împiedica să raportez toate mişcările la discul meu.
V. Bine, dar nu aţi simţit o forţă stranie care încearcă să vă îndepărteze de centrul discului ? Dacă discul Dvs. nu ar fi un fel de sistem de căluşei în rotaţie rapidă, cele două fenomene pe care le-aţi înregistrat, fără îndoială că n-ar fi avut loc : nici nu aţi fi simţit o forţă care vă împinge către periferie, nici nu aţi fi constatat că geometria euclidiană nu este aplicabilă în S.C.-ul Dvs. Aceste fapte nu sînt suficiente pentru a vă convinge că S.C.-ul Dvs. este în mişcare absolută ?
M. Cîtuşi de puţin. Bineînţeles că am înregistrat cele două fapte pe care le-aţi numit. Dar le pun pe seama unui cîmp gravitaţional cu structură specială care acţionează pe discul meu. Fiind îndreptat spre exteriorul discului., cîmpul acesta gravitaţional îmi deformează barele şi per-turbează ritmul ceasornicelor mele. Cîmpul gravitaţional, geometria neeuclidiană, ceasornicele cu ritmuri diferite, toate acestea pentru mine sînt strîns legate. Acceptînd orice S.C, trebuie să presupunem în mod. automat existenţa unui cîmp gravitaţional convenabil care-mi influenţează barele rigide şi ceasornicele.
V. Dar vă daţi seama ce greutăţi provoacă teoria Dvs. a relativităţii generale ? Ingăduiţi-mi să vă lămuresc
--1-1-1-1 punctul meu de vedere printr-un exemplu simplu, care nu
------este din domeniul fizicii. Să ne
reprezentăm un oraş ameri-~~ can, idealizat, constînd din
____străzi tăiate în unghi drept de
bulevarde, paralele, atît stră-____zile cît şi bulevardele fiind echidistante (fig. 68). In aceste con-1 ' ' diţii, cvartalurile fiind toate e-Fig> 68 gale ca mărime, se poate preciza lesne poziţia unuia dintre ele. Dar o asemenea construcţie ar fi imposibilă fără geometria euclidiană. Astfel, suprafaţa Pămîntului nostru n-am putea-o acoperi toată cu o asemenea reţea de străzi-bulevarde. Aruncînd o privire asupra

globului vă veţi convinge de aceasta. Dar nici discul Dvs. nu l-am putea acoperi cu un astfel de „oraş american sistematizat". Dvs. susţineţi că barele Dvs. au fost deformate de cîmpul gravitaţional. Faptul că nu puteţi verifica teorema lui Euclid privitoare la egalitatea rapoartelor dintre raze şi circumferinţe indică limpede că încercînd să acoperiţi o întindere destul de mare a discului Dvs. cu o asemenea reţea de străzi - bulevarde, mai devreme sau mai tîrziu, vă veţi izbi de dificultăţi şi veţi a-junge la concluzia că acest lucru este imposibil Geometria Dvs. pe discul în rotaţie se aseamănă cu cea de pe Fig 69
o suprafaţă curbă
pe care,, evident, reţeaua de străzi-bulevarde nu poate fi extinsă pe o întindere oricît de mare. Drept exemplu mai fizic să considerăm un plan încălzit neuniform, avînd deci temperaturi diferite în regiuni diferite. Puteţi, oare, executa reţeaua de „paralele — perpendiculare" formată din. mici bastonaşe de fier care se dilată cu temperatura T Bineînţeles că nu. Ei bine, cîmpul gravitaţional le joacă, barelor Dvs. acelaşi renghi ca şi variaţia de temperatură micilor bastonaşe de fier.
M. Toate acestea nu mă sperie. Reţeaua „străzi-bulevarde" serveşte la determinarea poziţiei punctelor, după cum ceasornicul serveşte la ordonarea evenimentelor. Dar pentru aceasta oraşul nu trebuie să fie neapărat de tip-american, el poate fi tot aşa de bine în stilul unui vechi oraş european. Imaginaţi-vă oraşul Dvs. idealizat construit din plastilină şi deformat după aceea. Şi în cazul acesta grupurile de case se pot foarte bine numerota, iar străzile şi bulevardele se pot încă identifica, deşi ele nu mai sînt drepte şi echidistante (fig. 69). Şi în cazul Pă

minutului nostru, poziţia unui punct poate fi precizată dacă i se indică longitudinea şi latitudinea, deşi meridianele şi paralelele nu constituie o reţea de tipul „oraşului american".
V. Eu văd totuşi o dificultate. Dvs. sînteţi nevoit să folosiţi structura de „oraş european". Eu sînt de acord că ea vă permite să ordonaţi punctele sau evenimentele, dar această construcţie vă va complica toate măsurările de distanţe. Ea nu va reda proprietăţile metrice ale spaţiului, cum face construcţia mea. Să luăm un exemplu. Eu ştiu că în oraşul meu american, pentru a străbate distanţa a 10 cvartaluri, trebuie să străbat dublul distanţei a cinci cvartaluri. Deoarece ştiu că toate pătratele sînt egale, pot determina indirect distanţele.
M. Este adevărat. In structura mea de „oraş european" eu nu pot măsura distanţa direct prin numărul pătratelor deformate. Trebuie să mai ştiu ceva ; trebuie să cunosc proprietăţile geometrice ale suprafeţei mele. Fiecare ştie că distanţa a două puncte, situate unul la 0°, celălalt la 10° longituăine nu este aceeaşi de-a lungul Ecuatorului sau pe o paralelă din apropierea Polului Nord. Cu toate acestea, fiecare navigator ştie să calculeze distanţa dintre două asemenea puncte, deoarece el cunoaşte proprietăţile geometrice ale Pămîntului nostru. El poate evalua distanţa fie prin calcul, bazîndu-se pe cunoaşterea trigonometriei sferice, fie experimental, străbătînd amin-două distanţele cu aceeaşi iuţeală. In cazul Dvs., întreaga problemă este banală, datorită faptului că toate străzile şi bulevardele sînt echidistante. In cazul Pămîntului nostru, lucrurile sînt mai complicate ; cele două meridiane 0° şi 10° se întîlnesc la polii Pămîntului şi sînt mai depărtate la Ecuator. In mod analog, pentru a determina distanţele în oraşul meu european eu trebuie să ştiu un element in plus faţă de Dvs., in oraşul Dvs. american. Dar eu îmi pot asigura această cunoştinţă suplimentară studiind proprietăţile geometrice ale continuumului meu în fiecare caz particular.
V. Toate acestea ne arată cît de incomodă este şi ce complicaţii provoacă renunţarea la structura simplă a geometriei euclidiene în favoarea sistemului complicat pe

care sînteţi obligat să-1 folosiţi Dvs. Este el cu adevărat necesar ?
M. Din păcate da, dacă vrem să aplicăm fizica noastră oricărui S.C. fără a recurge la misteriosul S.C. inerţial. Sînt de acord că aparatul meu matematic este mai complicat decît al Dvs., dar ipotezele mele fizice sînt mai simple şi mai fireşti.
Discuţia aceasta s-a limitat la continuumul bidimensional.
In realitate, în teoria relativităţii generale problema este şi mai complicată întrucît obiectul controversei nu este continuumul bidimensional, ci continuumul cuadri-dimensional spaţiu-timp. Dar ideile sînt aceleaşi ca cele schiţate în cazul bidimensional. în teoria relativităţii generale nu putem folosi sistemul mecanic de bare paralele-perpendiculare şi ceasornicele sincronizate ca în teoria relativităţii restrînse. Intr-un S.C. oarecare nu putem determina locul şi momentul în care se produce un eveniment, servindu-ne de bare rigide şi de ceasornice ritmice, sincronizate, ca în S.C.-uriltf inerţiale ale teoriei relativităţii restrînse. Cu barele noasfre neeuclidiene şi cu ceasornicele care au pierdut ritmul putem încă ordona evenimente, dar măsurători efective, care necesită bare rigide şi ceasornice perfect ritmice, şi sincronizate, pot fi executate numai într-un S.C. local inerţial. Pentru aceasta, întreaga teorie a relativităţii restrînse este valabilă. Dar S.C.-ul nostru este „bun" numai local, caracterul lui inerţial fiind limitat în spaţiu şi timp. Totuşi, chiar în S.C.-ul nostru oarecare putem prevedea rezultatele măsurătorilor făcute în S.C.-ul local inerţial. Dar pentru aceasta trebuie să cunoaştem caracterul geometric al continuumului nostru spaţiu-timp.
Experinţele noastre idealizate indică numai caracterul general al noii fizici relativiste. Ele ne arată că problema fundamentală este cea a gravitaţiei. Ele arată, de asemenea, că teoria relativităţii generale conduce la o generalizare a noţiunilor de timp şi spaţiu.

§ 33. RELATIVITATEA GENERALA ŞI VERIFICAREA EI
Teoria relativităţii generale încearcă să formuleze legi fizice valabile în toate S.C.-urile. Problema fundamentală a teoriei este cea a gravitaţiei. Această teorie face primul efort serios, de la Newton, în reformularea legii gravitaţiei. Este oare cu adevărat necesar acest lucru? Cunoaştem realizările teoriei lui Newton, marile succese ale astronomiei

bazate pe legea sa, a gravitaţiei. Legea lui Newton continuă să constituie baza tuturor calculelor astronomice. Am cunoscut însă şi unele obiecţii aduse vechii teorii. Legea lui Newton este valabilă numai în S.C.-ul inerţial al fizicii clasice, in S.C.-ul definit, cum ne amintim, prin condiţia ca legile mecanicii să fie valabile în el. Forţa de atracţie gravitaţională dintre două mase depinde de distanţa dintre ele. Legătura dintre forţă şi distanţă este, după cum ştim, invariantă faţă de transformarea clasică. Dar această lege nu se poate încadra în sistemul relativităţii restrînse, deoarece distanţa nu este invariantă faţă de transformarea Lorentz. Am putea încerca, aşa cum am făcut cu atîta succes cu legile mişcării, să generalizăm legea gravitaţiei astfel încît să se încadreze in teoria relativităţii restrînse sau, cu alte cuvinte, să o formulăm astfel încît să fie invariantă faţă de transformarea Lorentz şi nu faţă de transformarea clasică. Insă legea gravitaţională a lui Newton a zădărnicit toate eforturile noastre de a o simplifica şi de a o încadra în schema teoriei relativităţii restrînse. Dar chiar dacă am reuşi să facem aceasta, ar fi necesar încă un pas : trecerea de la S.C.-ul inerţial al teoriei relativităţii restrînse la S.C.-ul oarecare al teoriei relativităţii generale. Pe de altă parte, experienţele idealizate cu ascensorul în cădere indică lămurit că nu avem nici o şansă de a formula teoria relativităţii generale fără a soluţiona şi problema gravitaţiei. Consideraţiile de mai sus permit să înţelegem de ce soluţiile problemei gravitaţionale, în fizica clasică şi în relativitatea generală, vor fi diferite.

Am încercat din nou să indicăm calea care duce la teoria relativităţii generale şi motivele care ne determină să ne schimbăm încă o dată vechile concepţii. Vom

indica , fără a intra în structura formală a teoriei relativităţii generale, unele aspecte ale noii teorii a gravitaţiei. Faţă de tot ce s-a spus pînă acum, nu va fi prea greu să sezisăm natura diferenţelor dintre noua şi vechea teorie.

1. Ecuaţiile gravitaţiei din teoria relativităţii generale pot fi aplicate orcărui S.C. Folosirea unui S.C. particular într-un caz dat este numai o chestiune de comoditate ; teoretic, toate S.C.-urile sînt permise. Eliminînd gravitaţia, cădem automat peste S.C.-ul inerţial al teoriei relativităţii restrînse.

2. Legea gravitaţiei a lui Newton leagă mişcarea unui corp, aici şi acum, de acţiunea simultană (din acelaşi moment) a altui corp situat la mare distanţă. Legea aceasta constituie un prototip pentru întreaga noastră concepţie mecanicistă. Dar concepţia mecanicistă a dat faliment. Noul prototip al legilor naturii l-am descoperit în ecuaţiile lui Maxwell. Ecuaţiile lui Maxwell sînt legi de structură. Ele leagă evenimente care au loc, acum şi aici, cu evenimente care se vor produce, puţin mai tîrziu, în imediata apropiere. Ele descriu variaţiile cîmpului electromagnetic. Noile noastre ecuaţii gravitaţionale sînt, de asemenea, legi de structură care descriu variaţiile cîmpului gravitaţional. Din punctul de vedere formal, trecerea de la legea gravitaţiei a lui Newton la teoria relativităţii generale are oarecum, caracterul tranziţiei de la teoria fluidelor electrice şi legea lui Coulomb la teoria lui Maxwell.

3. Universul nostru nu este euclidian. Natura geometrică a lumii noastre este determinată de configuraţia maselor şi de viteza lor. Ecuaţiile gravitaţiei din teoria relativităţii generale încearcă să pună în lumină proprietăţile geometrice ale lumii noastre.

Să presupunem, pentru moment, că am reuşit să îndeplinim pînă la capăt programul teoriei relativităţii generale. Nu cumva sîntem ameninţaţi, în cazul acesta, să împingem speculaţiile prea departe de realitate ? Ştim cît de bine explică vechea teorie observaţiile astronomice. Există vreo posibilitate de a arunca o punte între noua teorie şi observaţie ? Orice speculaţie trebuie verificată prin experienţă şi orice rezultat, oricît de ademenitor ar fi el, trebuie respins dacă nu corespunde

faptelor. Cum a făcut faţă confruntării cu experienţa noua teorie a gravitaţiei ? La această întrebare se poate răspunde printr-o propoziţiune : Vechea teorie reprezintă un caz limită al celei noi. Dacă forţele gravitaţionale sînt relativ slabe, legile lui Newton reprezintă o bună a-proximaţie a legilor noi ale gravitaţiei. Prin urmare, toate observaţiile care confirmă vechea teorie confirmă totodată şi teoria relativităţii generale ; regăsim veichea teorie de pe planul superior al celei noi.

Chiar dacă în favoarea noii teorii n-ar pleda nici o observaţie suplimentară, dacă explicaţiile ei n-ar avea nici o calitate în plus faţă de cele ale vechii teorii, măr-ginindu-se doar să fie tot atît de bune ca ele, chiar în cazul acesta, dacă am fi puşi în situaţia de a alege între cele două teorii, ar trebui s-o preferăm pe cea nouă. In adevăr, chiar dacă din punctul de vedere formal ecuaţiile noii teorii sînt mai complicate, ele sînt mai simple din punctul de vedere al principiilor fundamentale, al ipotezelor care stau la baza lor. Cele două stafii : timpul absolut şi sistemul inerţial au dispărut. Firul conducător esenţial al echivalenţei dintre masa grea şi cea inertă a fost urmat pînă la capăt. Ne putem dispensa de orice presupunere privitoare la dependenţa forţelor de gravitaţie de distanţă. Ecuaţiile gravitaţionale au forma unor legi de structură, formă cerută tuturor legilor fizicii în-cepînd de la marile realizări ale teoriei cîmpului.

Din noile legi ale gravitaţiei pot fi deduse unele consecinţe noi, neconţinute în legea gravitaţională a lui Newton. Una din ele, curbarea unei raze de lumină într-un cîmp gravitaţional, am şi amintit-o. Vom menţiona acum alte două consecinţe.

Dacă vechile legi rezultă din cele noi cînd forţele de gravitaţie sînt slabe, în schimb, abaterile de la legea newtoniană a gravitaţiei sînt de aşteptat numai pentru forţe de gravitaţie relativ intense. Să examinăm sub acest aspect cazul sistemului nostru "solar.. Planetele, printre care şi Pămîntul nostru, se mişcă în jurul Soarelui pe orbite eliptice; planeta cea mai apropiată de Soare este Mercur. Distanţa dintre Soare şi Mercur fiind mai mteă decît cea dintre Soare şi orice altă planetă, forţa de a

Fig. 70

tracta dintre ele va fi cea mai intensă. Prin urmare, dacă există vreo speranţă să găsim o abatere de la legea lui Newton, şansele cele mai mari le avem în cazul planetei Mercur. Dacă, potrivit teoriei clasice, orbita descrisă de planeta Mercur este de acelaşi tip ca a oricărei alte planete, exceptînd faptul că ea este cea mai apropiată de Soare, în schimb, potrivit teoriei relativităţii generale mişcarea ar trebui / să se abată puţin de la e- / lipsă. Şi anume : conco- / mitent cu învîrtirea lui / Mercur în jurul Soarelui î ar trebui ca şi elipsa pe \ care o descrie el să se \ rotească foarte lent faţă \ de S.C.-ul legat de Soare \ (fig. 70). Această rotire a elipsei reprezintă efectul prevăzut de teoria relativităţii generale, căruia noua teorie îi prezice şi mărimea. Elipsa lui Mercur ar urma să efectueze o rotaţie completă în 3 milioane de ani. Se vede cît de infim este acest efect, şi cît de deşartă ar fi încercarea de a-1 pune în evidenţă în cazul planetelor mai îndepărtate de Soare.

Abaterea traiectoriei planetei Mercur de la elipsă era cunoscută înainte de formularea teoriei relativităţii generale, dar nu i se putuse găsi nici o explicaţie. Pe de altă parte, teoria relativităţii generale a fost elaborată în afara oricărei preocupări in legătură cu această problemă particulară. De abia mai tîrziu s-a tras concluzia* privitoare la rotirea elipsei în cursul revoluţiei unei planete în jurul Soarelui. în cazul lui Mercur, teoria a explicat cu succes abaterea mişcării de la legea lui Newton.

Mai există încă o concluzie dedusă din teoria relativităţii generale, care a fost comparată cu experienţa. Am văzut că un ceasornic aşezat pe cercul mare al discului în rotaţie are un ritm diferit de cel al unui ceasornic aşezat pe cercul mic. Asemănător, rezultă din teoria relativi—

taţii că întrucît influenţa cîmpului gravitaţional este mult mai puternică pe Soare decît pe Pămînt, un ceasornic situat pe Soare are un ritm diferit de cel al unui ceasornic situat pe Pămînt.

Am remarcat la pag. 80 că sodiul incandescent emite lumină galbenă, omogenă, cu o lungime de undă determinată, în această radiaţie atomul îşi exteriorizează unul din ritmurile sale ; atomul poate fi considerat ca un ceasornic, fiecare din lungimile de undă pe care le emite reprezentînd unul din ritmurile lui. Potrivit teoriei relativităţii generale, lungimea de undă a unei radiaţii emise de către atomul de sodiu situat pe Soare trebuie să fie ceva mai mare decît cea a radiaţiei corespunzătoare e-mise de un atom de sodiu pe Pămînt.

Problema verificării prin observaţie a consecinţelor teoriei este complicată şi, pînă în prezent, ea nu este nici pe departe definitiv soluţionată. Dat fiind însă că noi ne ocupăm numai cu ideile fundamentale, nu intenţionăm să intrăm mai adînc în această chestiune,

mulţumindu-ne 1 doar să afirmăm că, pînă în prezent, verdictul observaţiei pare să confirme concluziile teoriei relativităţii generale.

§ 34. CÎMP ŞI MATERIE

Am văzut cum şi de ce s-a prăbuşit punctul de vedere mecanicist. Nu a fost cu putinţă să se explice toate fenomenele prin acţiunile unor forţe simple ce se exercită între particule invariabile. Primele noastre încercări de a depăşi punctul de vedere mecanicist şi de a introduce conceptul de cîmp au obţinut cel mai mare succes în domeniul fenomenelor electromagnetice. S-au formulat astfel legile de structură ale cîmpului electromagnetic, legi care leagă între ele evenimente foarte apropiate în spaţiu şi timp. Aceste legi concordă cu sistemul teoriei relativităţii restrînse, doarece ele sînt invariante faţă de transformarea Lorentz. Mai tîrziu, teoria relativităţii generale a formulat legile gravitaţiei. Ele sînt tot legi de structură, care descriu cîmpul gravitaţional dintre particulele materiale. A -fost, de asemenea, uşor să se generalizeze legile lui Maxwell

astfel încît ele să se poată aplica oricărui S.C. întocmai ca legile gravitaţiei din teoria relativităţii generale.

Avem două realităţi : materia şi cîmpul. Este evident că, spre deosebire de fizicienii de la începutul secolului trecut, noi nu putem concepe o fizică construită în întregime pe conceptul de materie. în stadiul actual acceptăm ambele concepte. Putem, însă, considera materia şi cîmpul ca fiind realităţi distincte şi diferite ca natură ? Fiind dată o mică particulă (de materie) ne-am putea imagina, în mod naiv, o suprafaţă definită începînd de la care particula ar lua sfîrşit şi ar începe cîmpul ei gravitaţional, în această reprezentare, trecerea de la regiunea în care sînt valabile legile cîmpului la regiunea în care este prezentă materia s-ar face brusc. Care ar fi, în cazul acesta, criteriile fizice de deosebire a materiei de cîmp ? înainte de a fi învăţat ceva despre teoria relativităţii am fi fost înclinaţi să răspundem astfel la această întrebare : materia are masă în vreme ce cîmpul nu are. Cîmpul reprezintă energie, materia reprezintă masă. Dar, în lumina noilor cunoştinţe dobindite, trebuie să considerăm nesatisfăcător acest răspuns. Din teoria relativităţii ştim că materia reprezintă un imens rezervor de energie şi că energia reprezintă materie. Prin urmare, nu putem stabili o distincţie calitativă între materie şi cîmp, căci distincţia dintre masă şi energie nu este calitativă. Cea mai mare parte a energiei este concentrată in materie, dar cîmpul care înconjoară particula reprezintă tot energie, deşi într-o cantitate incomparabil mai mică. Am putea spune : avem materie unde concentrarea energiei este mare şi cîmp unde concentrarea energiei este mică. Dar, în cazul acesta, diferenţa dintre materie şi cîmp este mai degrabă cantitativă decit calitativă. N-are deci nici un sens să considerăm că materia şi cîmpul sînt două calităţi cu totul diferite una de alta. Nu ne putem imagina o suprafaţă definită care să constituie o demarcaţie netă între cîmp şi materie.

Aceeaşi dificultate intervine şi în cazul sarcinii şi a cîmpului ei. în concluzie, pare imposibil să găsim un criteriu calitativ plauzibil pentru a discerne între materie şi cîmp sau între sarcină şi cîmp.

Legile noastre de structură, adică legile lui Maxwell, şi legile gravitaţiei nu mai sînt valabile în cazul concentrărilor intense ale energiei sau, cum se spune, în regiunile unde sînt prezente izvoare ale cîmpului, adică sarcini electrice, respectiv materie. Dar n-am putea noi oare* graţie unei uşoare modificări, să facem ecuaţiile noastre valabile pretutindeni, chiar şi în regiunile în care energia este extrem de concentrată ?

Nu putem construi fizica numai pe baza conceptului de materie. După stabilirea echivalenţei dintre masă şi energie, despicarea în materie şi cîmp are un caracter artificial, neputînd fi clar definită. Nu am putea elimina conceptul de materie, construind o fizică bazată numai pe conceptul de cîmp ? Ceea ce dă simţurilor noastre impresia de materie este în realitate o mare concentrare de energie într-un spaţiu relativ mic. Am putea considera materie acele regiuni ale spaţiului în care cîmpul este extrem de puternic. S-ar putea crea astfel un nou cadru filosofic. Obiectivul final ar fi explicarea tuturor evenimentelor din natură prin legi de structură valabile întotdeauna şi pretutindeni. în această interpretare, o piatră în zbor ar reprezenta un cîmp variabil ale

cărui stări de maximum de intensitate s-ar propaga in spaţiu cu viteza pietrei. în noua noastră fizică nu ar fi loc şi pentru cîmp şi pentru materie, cîmpul fiind singura realitate. Această nouă concepţie ne este sugerată de marile realizări ale fizicii cîmpului, de succesele obţinute graţie exprimării legilor electricităţii, magnetismului şi gravitaţiei sub formă de legi de structură şi, în sfîrşit, de echivalenţa dintre masă şi energie. Aşadar, ultima noastră problemă ar fi modificarea legilor cîmpului astfel încît să devină aplicabile pentru regiunile în care energia are o concentrare uriaşă.
Dar pînă acum nu am reuşit să aducem la îndeplinire acest program în mod plauzibil şi consecvent. Urmează ca viitorul să hotărască dacă el este sau nu realizabil,, în stadiul actual, în toate construcţiile noastre teoretice,, trebuie să continuăm să luăm în considerare două realităţi : cîmpul şi materia.
Ne mai aşteaptă o serie de probleme fundamentale,.
Cîmp, relativitate
89
Ştim că toată materia este alcătuită din puţine feluri de particule. Cum intervin aceste particule elementare în construcţia diferitelor forme ale materiei. Cum interac-ţionează aceste particule elementare cu cîmpul ? Căutîn-du-se un răspuns la aceste probleme, au fost introduse în fizică idei noi, ideile teoriei cuantelor. Rezumăm :
O nouă noţiune apare în fizică, cea mai importantă invenţie de la Newton încoace : cîmpul. A fost necesar un mare efort de imaginaţie ştiinţifică pentru a sezisa că noţiunea esenţială pentru descrierea fenomenelor fizice nu este sarcina sau particula, ci cîmpul care domneşte în spaţiul dintre sarcini şi particule. Conceptul de cîmp este încununat de un succes strălucit şi conduce la formularea ecuaţiilor lui Maxwell care descriu structura cîmpului electromagnetic şi care guvernează atît fenomenele electrice cît şi pe cele optice.
Teoria relativităţii s-a născut din problemele cîmpului. Contrazicerile şi inconsecvenţele vechilor teorii ne-au constrîns să atribuim noi proprietăţi continuumului spaţiu-timp, scena tuturor evenimentelor din lumea noastră fizică.
Teoria relativităţii se djezvoltă in două etape. Primei etapă conduce le ceea ce se numeşte teoria relativităţii restrînse care se aplică numai sistemelor de coordonate inerţiale adică sistemelor în care este valabilă, legea inerţiei,J aşa cum fusese ea formulată de către Newton. Teoria relativităţii restrînse se bazează pe două ipoteze fundamentale :
legile fizicii sînt aceleaşi în toate sistemele de coordonate care se mişcă uniform unul faţă de altul;
viteza luminii are întotdeauna aceeaşi valoare.
Din aceste ipoteze, confirmate pe deplin de experienţă, sînt deduse proprietăţile barelor în mişcare şi ale ceasornicelor, variaţiile lor în lungime şi ritm depinzlnd de viteză. Teoria relativităţii modifică, legile mecanicii. Vechile legi nu mai sînt valabile dacă viteza particulei în mişcare se apropie de cea a luminii. Noile legi valabile pentru corpurile în mişcare, aşa cum au fost ele reformu-late de teoria relativităţii, sînt confirmate strălucit de
89
Evoluţia fizicii
experienţă. O altă consecinţă a teoriei relativităţii restrînse este legătura dintre masă şi energie. Masa este energie şi energia are masă. Cele două legi de conservare, a masei şi a energiei, sînt contopite de teoria relativităţii într-una singură, anume, legea de conservare a masei-energie.
Teoria relativităţii generale face o analiză şi mai a-profundată a continuumului spaţiu-timp. Valabilitatea teoriei nu este restrînsă la sistemele de coordonate inerţiale. Teoria atacă problema gravitaţiei şi formulează noi legi de structură pentru cîmpul gravitaţional. Ea ne obligă să analizăm rolul jucat de geometrie în descrierea lumii fizice. Ea consideră esenţială egalitatea dintre masa gravifică şi cea inertă, nu întîmplătoare ca în mecanica clasică. Consecinţele experimentale ale teoriei relativităţii generale se deosebesc, numai în mică măsură, de cele ale mecanicii clasice. Ele fac faţă verificărilor experimentale ori de cîte ori confruntarea este posibilă. Dar superioritatea teoriei rezidă în consistenţa ei interioară, şi în simplicitatea ipotezelor ei fundamentele.

Teoria relativităţii scoate în evidenţă importanţa conceptului de cîmp în fizică. Totuşi, nu am reuşit încă să formulăm o fizică a cîmpului, pură. In stadiul actual sîntem încă, obligaţi să acceptăm atît existenţa cîmpului cît şi a materiei.

IV TEORIA CUANTELOR

Continuitate, discontinuitate. — Cuante elementare de materie şi de electricitate. — Cuante de lumină. — Spectre luminoase. — Unde de materie. — Unde de probabilitate — Fizica şi realitatea.

§ 35. CONTINUITATE, DISCONTINUITATE

Sub ochii noştri este desfăşurat un plan al oraşului New-York şi al împrejurimilor sale. Ne punem întrebarea : în care puncte ale acestui plan se poate ajunge cu trenul? După ce extragem aceste puncte dintr-un mers al trenurilor, le însemnăm pe plan. Să schimbăm acum întrebarea : în care puncte se poate ajunge cu automobilul ? Pentru a le găsi este de ajuns să reprezentăm, prin xinii, pe plan toate şoselele care pleacă din New-York, căci oricare punct situat pe una din aceste şosele poate fi efectiv atins, călătorind cu automobilul. în amîndouă cazurile avem sisteme de puncte. însă în primul caz ele re-prezintă staţii de cale ferată şi, ca atare, sînt răzleţe, în vreme ce în al doilea, ele sînt toate punctele situate în lungul liniilor care reprezintă şoselele. Să trecem acum la altă întrebare ; la ce distanţă de New-York sau, mai riguros, de un anumit loc din New-York se găseşte un asemenea punct ? în primul caz, acestor distanţe le corespund numere diferite. Aceste numere diferă între ele prin salturi neregulate, dar intodeauna finite. Vom exprima aceasta spunînd că distanţele de la New-York pînă la locurile unde se poate ajunge cu trenul variază în mod discontinuu, în vreme ce distanţele pînă la locurile la care se poate ajunge cu automobilul pot varia în trepte oricît de mici, ele pot varia în mod continuu. Va

riaţiile distanţelor pot fi făcute arbitrar de mici în cazul automobilului, nu insă şi în cazul trenului.

Extracţia unei mine de cărbuni poate varia în mod continuu. Cantitatea de cărbune produsă poate fi sporită, sau redusă, în trepte arbitrar de mici. Dar numărul minerilor folosiţi poate varia numai discontinuu. Ar fi cu totul absurd să spunem : „de ieri, numărul salariaţilor a crescut cu 3,783".

O persoană căreia i s-ar cere să spună citi bani are în buzunar nu poate spune un număr cu mai mult de două zecimale. O sumă de bani poate varia numai în salturi, în mod discontinuu. în America, cea mai mică monedă, să-i spunem cuanta elementară pentru moneda a-mericană, este centul. Cuanta elementară pentru moneda engleză este „farthing-ul" care valorează numai jumătate din cuanta elementară americană. Avem exemplul a două cuante elementare ale căror valori pot fi comparate între ele. Raportul valorilor lor are o semnificaţie definită, dat fiind că una din ele valorează de două ori mai mult decît cealaltă.

Putem spune : unele cantităţi pot varia continuu, altele numai discontinuu, în trepte care nu mai pot fi micşorate. Aceste cantităţi indivizibile se numesc cuante elementare ale mărimii particulare la care se referă.

Cînd cîntărim cantităţi mari de nisip putem considera că masa lui este continuă deşi structura lui este, evident, granulară. Dacă nisipul ar fi însă foarte preţios, şi dacă balanţele folosite ar fi foarte sensibile, ar trebui să ţinem seama de faptul că masa variază întotdeauna printr-un multiplu al unui grăunte. Masa aceasta a unui grăunte ar reprezenta cuanta noastră elementară. Din acest exemplu, vedem cum, mărind precizia măsurărilor, poate fi pus în evidenţă caracterul discontinuu al unei cantităţi considerată pînă atunci continuă.

Dacă ni s-ar cere să caracterizăm ideea principală a teoriei cuantelor într-o singură frază am putea spune : trebuie să admitem că anumite cantităţi fizice, considerate pînă în prezent continue, sînt în realitate compuse din cuante elementare.

Domeniul de fapte îmbrăţişat de teoria cuantelor este

foarte mare. Aceste fapte au fost puse în evidenţă de către tehnica extrem de dezvoltată a experienţelor moderne. Cum noi nu putem nici executa nici descrie experienţele

fundamentale, vom fi nevoiţi, deseori, să menţionăm rezultatele lor in mod dogmatic. Scopul nostru este să explicăm numai principiile pe care se bazează această teorie.

§ 36. CUANTE ELEMENTARE DE MATERIE ŞI DE ELECTRICITATE

In imaginea despre materie, dată de teoria cinetică, toate elementele sînt construite din molecule. Să luăm cazul cel mai simplu al elementului cel mai uşor, hidrogenul. La pag. 55 am arătat că studiul mişcării browniene permite determinarea masei unei molecule de hidrogen. Valoarea ei este

0,000 000 000 000 000 000 000 003 3 grame.

Aceasta înseamnă că masa este discontinuă. Masa unei cantităţi de hidrogen poate varia numai printr-un număr întreg de trepte mici, fiecare corespunzînd masei unei singure molecule de hidrogen. Dar procesele chimice arată că molecula de hidrogen poate fi scindată in două părţi, sau cu alte cuvinte că molecula de hidrogen este compusă tiin doi atomi. In procesele chimice, rolul principal îl joacă atomul şi nu molecula. împărţind numărul de mai sus la 2 găsim masa unui' atom de hidrogen. Ea este de aproximativ :

0, 000 000 000 000 000 000 000 001 7 grame.

Masa este o cantitate discontinuă. Evident, nu este insă nevoie să ţinem seama de acest lucru cînd cintărim un corp ; chiar cele mai sensibile balanţe sint departe de a atinge gradul de precizie necesar pentru a putea pune în evidenţă discontinuitatea masei.

Să ne întoarcem la un fapt bine cunoscut. O sîrmă este legată la o sursă de curent. Prin fir începe să treacă un curent de la potenţialul mai înalt la potenţialul mai

scăzut. Ne amintim că multe fapte experimentale fuseseră explicate cu ajutorul teoriei simple a fluidelor electrice, care ar curge prin fir. Ne amintim de asemenea (pag. 65) că fusese numai o chestiune de convenţie să admitem că fluidul pozitiv curge de la potenţialul mai înalt la cel mai jos, sau că fluidul negativ curge de la potenţialul mai jos la cel mai înalt. Să facem abstracţie, pentru moment, de toate progresele ulterioare realizate pe baza conceptelor de cîmp. Menţinîndu-ne chiar în cadrul teoriei fluidelor electrice, mai rămîn de lămurit unele probleme. Cum indică termenul de „fluid", la început electricitatea fusese privită ca avînd un caracter continuu. Potrivit acestor concepţii vechi, încărcarea electrică putea fi variată în trepte arbitrar de mici. Nu era necesar să se presupună existenţa unor cuante elementare de electricitate. Cuceririle teoriei cinetice au pregătit însă terenul pentru o nouă întrebare : există cuante elementare de fluid electric ? O a doua chestiune care trebuie lămurită este dacă curentul consistă din curgerea fluidului negativ, a celui pozitiv sau a ambelor fluide ? Ideea tuturor experinţelor menite să răspundă la această întrebare a fost de a extrage fluidul electric din sîrmă şi a-1 sili să treacă prin vid, a-1 desface din orice asociere cu materia şi a-i cerceta apoi proprietăţile care, in aceste condiţii, ar urma să apară cel mai clar. Multe asemenea experienţe au fost efectuate către sfîrşitul secolului al XlX-lea. înainte de a explica principiul, cel puţin al unuia din dispozitivele experimentale folosite, vom lua în considerare numai rezultatele. Fluidul eilectric care curge prin sîrmă este negativ şi este deci dirijat de la potenţialul mai scăzut către cel mai înalt. Dacă am fi ştiut aceasta de la început, cînd s-a creat teoria fluidelor electrice, cu siguranţă că am fi schimbat între ele cuvintele, numind pozitivă' electricitatea barei de ebonită şi negativă pe cea a barei de sticlă. Ni s-ar fi părut atunci mai convenabil să considerăm pozitiv fluidul care trece prin fir. Dar, deoarece presupunerea noastră iniţială a fost greşită, acum sîntem nevoiţi să ne acomodăm cu acest inconvenient. Următoarea chestiune importantă este dacă structura acestui fluid negativ este „granulară!4, dacă el

este sau nu compus din cuante electrice. Un alt şir de experienţe, independente unele de altele, au arătat că existenţa unei cuante elementare de electricitate negativă este neîndoielnică. Fluidul electric negativ este constituit din grăunţe, întocmai ca o plajă din fire de nisip, sau o casă din cărămizi. Cel mai clar a formulat acest rezultat J. J. Thomson, în urmă cu vreo 40 de ani. Aceste cuante elementare de electricitate negativă se numesc electroni. ~

Prin urmare, orice sarcină e-
uneori chiar convenabil să g g
o considerăm ca o cantitate Fi ^

continuă. Astfel, teoriile ato- lg'
mice şi electronice introduc în ştiinţă cantităţi fizice discontinue care pot varia numai în salturi.
Să introducem două plăci metalice paralele într-o incintă din care s-a scos tot aerul (fig. 71). Fie una din plăci înţărcată pozitiv, cealaltă negativ. O sarcină de probă, pozitivă, introdusă între cele două plăci va fi respinsă de placa încărcată pozitiv şi atrasă de placa încărcată negativ. Prin urmare, liniile de forţă ale cîmpului electric vor fi îndreptate de la placa încărcată pozitiv către cea încărcată negativ. Forţa care ar acţiona asupra unui corp de probă încărcat negativ ar avea sensul opus. Dacă plăcile sînt de ajuns de mari, liniile de forţă dintre ele vor fi la fel de dese pretutindeni ; oriunde ar fi aşezat corpul de probă, forţa deci şi densitatea liniilor de forţă ar fi aceleaşi. Electronii introduşi undeva între plăci s-ar comporta ca nişte picături de-ploaie în cîmpul gravitaţional al Pămîntului, deplasindu-se paralel, unul faţă de altul, de la placa încărcată negativ
lectrică negativă este compusă dintr-o puzderie de sarcini elementare adică de electroni. Sarcina negativă, întocmai ca masa, poate varia numai discontinuu. Sarcina electrică elementară este însă atît de mică încît în multe cercetări este posibil şi
l
92
Evoluţia fizicii
către cea încărcată pozitiv. Există multe dispozitive experimentale capabile să pună în libertate o ploaie de electroni într-un asemenea cîmp care îi va orienta la fel pe toţi. Unul dintre cele mai simple procedee este de a introduce o sirmă incandescentă între plăcile încărcate. Un astfel de fir înroşit emite electroni care sînt apoi orientaţi de liniile de forţă ale cîmpului exterior. Pe acest principiu sînt bazate, de exemplu, tuburile de radio, familiare tuturor.
Multe experienţe foarte ingenioase au fost efectuate cu fascicule de electroni. S-a studiat devierea (traiectoriilor) lor în diferite cîmpuri electrice şi magnetice exterioare. S-a putut chiar izola un singur electron, determi-nîndu-i-se astfel sarcina şi masa adică rezistenţa lui inerţială faţă de acţiunea unei forţe exterioare. Aici ne vom mărgini să indicăm valoarea masei unui electron. S-a stabilit că ea este cam de 2 000 de ori mai mică decît masa unui atom de hidrogen. Astfel masa unui atom de hidrogen, cît ar fi ea de mică, poate fi considerată mare in comparaţie cu masa unui electron. Din punctul de vedere al unei teorii consecvente a cîmpului, întreaga masă, adică întreaga energie a unui electron, ar fi energia cîmpului său. Intensitatea lui este mare numai în interiorul unei mici sfere, iar la mare distanţă de „centrul" unui electron eimpul este slab.
Am spus mai sus că atomul oricărui element este ultima lui subdiviziune. Această afirmaţie a fost mult timp luată drept bună. Astăzi ea este, însă, depăşită. Ştiinţa şi-a făurit o nouă imagine care arată limitele celei vechi, în prezent, aproape că nu există concepţie a fizicii mai bine fundată pe fapte decît cea privitoare la structura complexă a atomului. Prima etapă a fost recunoaşterea faptului că electronul, cuanta elementară de fluid electric negativ, este şi unul din componenţii atomului, una din cărămizile elementare din care este construită toată materia. Procedeul citat mai înainte, al sîrmei încălzite care emite electroni, este numai unul din numeroasele procese prin care se pot extrage din materie aceste particule. Această concluzie care leagă strîns problema struc
Teoria cuantelor
92
turii materiei cu cea a electricităţii, decurge fără nici o îndoială din multe fapte experimentale independente.
Este relativ uşor să extragem dintr-un atom o parte din electronii care îl compun. Aceasta se poate realiza nu numai prin încălzire, ca în exemplul de mai sus al sîrmei incandescente, ci şi prin alte procedee, de exemplu, prin bombardarea atomilor cu alţi electroni.
Să presupunem că am introdus în hidrogen rarefiat un fir metalic subţire, încălzit la roşu. Firul va emite în toate direcţiile electroni, cărora, sub acţiunea unui cîmp electric exterior, li se va imprima o viteză dată. Un electron îşi măreşte viteza întocmai ca o piatră care cade în cîmpul gravitaţional. Prin metoda aceasta, putem obţine un fascicul de electroni care se deplasează cu o anumită viteză într-o direcţie anumită. Astăzi putem imprima electronilor viteze comparabile cu cea a luminii, supu-nîndu-i acţiunii unor cîmpuri foarte

intense. Ce se întîmplă dacă un fascicul de electroni, cu o anumită viteză, ciocneşte o moleculă de hidrogen ?
Dacă electronul este destul de rapid, izbitura lui va determina nu numai spargerea moleculei de hidrogen în cei doi atomi ai săi, ci şi zmulgerea unui electron unuia din cei doi atomi.
Să admitem că electronii intră în constituţia materiei. Atunci urmează că un atom căruia i s-a zmuls un electron nu poate fi considerat neutru din punctul de vedere electric. Dacă înainte de pierderea unei sarcini elementare el fusese neutru, atunci el nu mai poate fi şi după aceea : fragmentul rămas trebuie să fie pozitiv. Şi cum masa unui electron este de atîtea ori mai mică decît cea a atomului cel mai uşor, putem conchide, cu certitudine, că cea mai mare parte din masa unui atom nu este reprezentată de electroni, ci de ansamblul particulelor elementare rămase, care sînt mult mai grele decît electronii. Vom denumi această parte mai grea a unui atom, nucleul lui.
Fizica modernă experimentală a creat metode de a sparge nucleul unui atom, de a transmuta atomii unui element în atomii altui element şi de a extrage din nucleu particulele elementare grele din care este alcătuit. Acest capitol al fizicii, cunoscut sub numele de „fizică nucleară",

la care a contribuit atît de mult Rutherford, este, din punctul de vedere experimental, cel mai interesant. Dar pînă la ora actuală lipseşte încă o teorie simplă, din punctul de vedere al ideilor ei fundamentale, care să interpreteze marea varietate de fapte din domeniul fizicii nucleare. Şi cum în aceste pagini ne interesează numai ideile fizice generale, vom trece peste acest capitol, în ciuda marii sale importanţe pentru fizica modernă.
§ 37. CUANTE DE LUMINA
Să considerăm un dig ridicat de-a lungul malului mării. Valurile îl lovesc necontenit, îl rod şi se retrag lăsînd cîirfp liber pentru alte valuri care înaintează. Masa digului descreşte şi vom putea spune ce parte din zid a fost roasă, de exemplu, într-un an. Să ne reprezentăm acum un proces diferit. Voim să micşorăm masa digului cu aceeaşi cantitate dar pe altă cale. Pentru aceasta tragem cu gloanţe asupra digului ; din locurile atinse se vor desprinde fragmente de zid. Masa digului va descreşte şi ne putem uşor imagina că ea a scăzut cu aceeaşi cantitate în ambele cazuri. Din aspectul digului, vom putea recunoaşte uşor dacă masa lui a scăzut sub acţiunea continuă a valurilor sau sub cea discontinuă a ploii de gloanţe. Pentru înţelegerea fenomenelor pe care le descriem, este necesar să ne întipărim în minte diferenţa dintre acţiunea mării şi cea a grindinii de proiectile.
Am spus mai sus că un fir încălzit emite electroni. Vom prezenta acum un alt mod de a extrage electroni dintr-un metal. Lumina omogenă, de exemplu lumina violetă, care după cum ştim are o lungime de undă determinată, este lăsată să bombardeze o suprafaţă metalică. Lumina zmulge electroni din metal. Electronii se depărtează de metal şi, ca o ploaie, se deplasează cu o viteză dată. Din punctul de vedere al principiului energiei, putem să spunem că energia luminii a fost transformată, parţial, în energia cinetică a electronilor expulzaţi. Tehnica experimentală modernă ne permite să înregistrăm, aceste proiectile electronice, şi să le determinăm viteza şi deci energia. Această zmulgere a electronilor dintr-un

metal de către lumina care cade asupra lui se numeşte efect fotoelectric.
Am pornit de la acţiunea unei unde de lumină omogenă de anumită intensitate. Dar, ca în orice experienţă, trebuie să schimbăm acum condiţiile de lucru spre a stabili dacă aceasta are vreo influenţă asupra efectului observat.
începem prin a varia intensitatea luminii omogene violete care cade asupra plăcii de metal pentru a stabili în ce măsură energia electronilor emişi depinde de intensitatea luminii incidente. Să încercăm să deducem rezultatul prin raţionament, nu prin experienţă. Am putea raţiona astfel : în efectul fotoelectric o anumită fracţiune din energia radiaţiei este transformată în energia de mişcare a electronilor. Dacă iluminăm metalul cu lumină de aceeaşi lungime de undă, provenită însă de la un izvor mai intens, atunci energia electronilor emişi ar trebui să fie mai mare deoarece radiaţia este mai

bogată in energie. Ar trebui deci să ne aşteptăm ca viteza electronilor emişi să crească pe măsură ce creşte intensitatea luminii incidente. Dar experienţa contrazice, şi de data aceasta, prezicerea noastră. Constatăm încă o dată că legile naturii nu sînt aşa cum le-am dori noi. Ne găsim din nou în prezenţa unei experienţe care contrazice prezicerile noastre, răsturnînd prin aceasta teoria din care au decurs. Rezultatul efectiv al experienţei este, din punctul de vedere al teoriei ondulatorii, surprinzător : electronii observaţi au toţi aceeaşi viteză ; energia lor nu variază cînd creşte intensitatea luminii. Acest rezultat experimental nu ar fi putut fi prezis de teoria ondulatorie. Şi în cazul acesta răsare o nouă teorie din dezacordul dintre vechea teorie şi experienţă.
Să fim în mod intenţionat nedrepţi faţă de teoria ondulatorie a luminii trecînd sub tăcere marile ei succese : explicarea strălucită dată fenomenului de ocolire de către razele de lumină a obstacolelor foarte mici. Să ne concentrăm atenţia asupra efectului fotoelectric şi să-i cerem teoriei o explicaţie adecuată a acestui efect. Evident, nu putem deduce din teoria ondulatorie independenţa energiei electronilor de intensitatea luminii sub a cărei

acţiune fuseseră extraşi din placa de metal. Vom încerca o altă teorie. Ne amintim că teoria corpusculară a lui Newton, care explicase multe din fenomenele optice, nu a putut explica fenomenele observate în cazul difracţiei luminii, suferind un eşec. Să trecem acum peste el in mod intenţionat. în timpul lui Newton, noţiunea de energie nu exista. După el, corpusculele de lumină erau lipsite de greutate ; fiecărei culori îi corespundea altă specie de corpuscule, reprezentînd altă substanţă. Mai tîrziu, după ce a fost creat conceptul de energie şi s-a stabilit că lumina transportă energie, nimănui nu i-a trecut prin gînd să aplice acest concept teoriei corpusculare a luminii-Teoria lui Newton căzuse şi, pînă în secolul nostru, reînvierea ei nu părea să prezinte interes.
Pentru a menţine ideea principală a teoriei lui Newton trebuie să presupunem că lumina omogenă este compusă din grăunţe de energie, înlocuind deci corpusculele de lumină, primitive, prin mici porţiuni de energie, cuantele de lumină, care călătoresc în vid cu viteza luminii, şi pe care le vom numi fotoni. Reînvierea teoriei lui Newton^ in această nouă formă, conduce la teoria cuantică a luminii. Nu numai materia şi sarcina electrică ci şi energia radiantă are o structură granulară adică este constituită din cuante de lumină. în concluzie, în afară de cuantele de materie şi cuantele de electricitate există şi cuante de energie.
Ideea cuantei de energie a fost introdusă de către Planck la începutul acestui secol, pentru a explica anumite fenomene mult mai complicate decît efectul fotoelectric. Dar efectul fotoelectric demonstrează mai limpede şi mai simplu necesitatea schimbării vechilor noastre concepţii.
Este evident, de la prima vedere, că această teorie cuantică a luminii explică efectul fotoelectric. O ploaie de fotoni cade pe o placă de metal ; acţiunea dintre radiaţie şi materie consistă, în cazul acesta, din foarte multe procese individuale de tipul : un foton izbeşte un atom şi-i zmulge un electron. Aceste procese individuale sînt toate identice şi electronul extras va avea aceeaşi energie în fiecare caz. Este clar, de asemenea, că în noul nostru

limbaj, a mări intensitatea luminii incidente înseamnă a mări numărul de fotoni care cad. Prin urmare, ceea ce ar urma să se schimbe este numărul de electroni expulzaţi din placa de metal, energia fiecăruia rămînînd însă aceeaşi. Se vede dar că această teorie e în perfectă concordantă cu observaţia.
Ce se va întîmpla dacă pe suprafaţa metalului ar cădea o rază de lumină omogenă de altă culoare decit cea violetă, să zicem o rază roşie ? Răspunsul la această întrebare să-1 lăsăm în seama experienţei. Pentru aceasta vom măsura energia electronilor extraşi de lumina roşie comparînd-o apoi cu cea a electronilor zmulşi de lumina violetă. Vom constata că energia electronilor extraşi de lumina roşie este mai mică decît cea a electronilor extraşi de lumina violetă. Cu alte cuvinte, energia cuantelor de lumină este diferită pentru culori diferite. Fotonii corespunzători culorii roşii au jumătate din energia celor care corespund culorii violete. Sau, mai general, energia unei cuante de lumină corespunzînd unei culori omogene descreşte in proporţia în care creşte lungimea de undă. Există, aşadar, o deosebire esenţială între cuantele de energie şi cuantele de

electricitate : cuantele de lumină sînt diferite pentru fiecare lungime de undă, în vreme ce cuantele de electricitate sînt întotdeauna aceleaşi. Dacă am vrea să folosim una dintre analogiile noastre precedente ar trebui să comparăm cuantele de lumină cu sub-diviziunile monetare cele mai mici, care diferă de la ţară la ţară.
Să facem, şi mai departe, abstracţie de teoria ondulatorie a luminii presupunînd că structura luminii este granulară şi că eş este formată din cuante de lumină, adică din fotoni cari străbat spaţiul cu viteza luminii. Astfel, în noua noastră imagine, lumina este o ploaie de fotoni, iar fotonul este cuanta elementară de energie luminoasă. Insă dacă am părăsit teoria ondulatorie, conceptul de lungime de undă şi-a pierdut semnificaţia. Ce noţiune nouă urmează să-i ia locul ? Energia cuantei de lumină ! Cu această precizare orice aserţiune formulată în termenii teoriei ondulatorii poate fi transpusă într-o aserţiune a teoriei cuantice a radiaţiei. De exemplu :

Terminologia teoriei ondulatorii
Terminologia teoriei cuantice
Lumina omogenă are o lungime de undă definită. Lungimea de undă a extremităţii roşii a spectrului este de două ori mai mare decît cea a extremităţii violete.
Lumina omogenă conţine fotoni de energie definită. E-nergia fotonului din extremitatea roşie a spectrului este jumătate din cea corespunzătoare celei violete.
Situaţia puate fi rezumată după cum urmează : există fenomene care pot fi explicate de teoria cuantică, dar nu şi de teoria ondulatorie ; un exemplu îl reprezintă efectul fotoeleetric, dar se cunosc şi alte fenomene de acest gen. Există fenomene care pot fi explicate de teoria ondulatorie, dar nu pot fi explicate de teoria cuantică, un exemplu tipic fiind ocolirea obstacolelor de către lumină. în sfîrşit, există fenomene, ca de pildă propagarea rectilinie a luminii, care pot fi explicate deopotrivă de bine atît de o teorie cît şi de cealaltă.
Dar ce este lumina în realitate ? Este ea o undă sau o ploaie de fotoni ? Cîndva neTam pus o întrebare asemănătoare, anume dacă lumina este o undă sau un roi de corpuscule luminoase. în stadiul acela aveam toate motivele să respingem teoria corpusculară a lumii şi să acceptăm teoria ondulatorie care îmbrăţişa toate fenomenele. Acum, însă, problema este mult mai complicată. Nu vedem cum s-ar putea face o descriere consecventă a tuturor fenomenelor optice adoptmd unul singur din cele două limbaje posibile. Face impresia că am fi nevoiţi să ne folosim cînd de o teorie, cînd de cealaltă, iar uneori ar trebui să facem uz de amîndouă. Ne găsim în faţa unei dificultăţi de un tip nou. Avem două imagini contradictorii ale realităţii ; luate separat, nici una din ele nu poate explica integral fenomenele luminoase ; împreună, însă, da.
Cum s-ar putea oare combina aceste două imagini ? Cum am putea explica aceste două aspecte radical diferite ale luminii ? Nu este uşor să facem faţă acestei noi dificultăţi. Ne găsim din nou in prezenţa unei probleme fundamentale.
Să acceptăm pentru moment teoria fotonică a luminii şi să încercăm să înţelegem cu ajutorul ei fapte
Teoria cuantelor

explicate pînă acum de teoria ondulatorie. în felul acesta, vom sublinia dificultăţile care fac, la prima vedere, ca cele două teorii să pară de neîmpăcat.
Ne amintim : un fascicul de lumină omogenă trecînd printr-un orificiu mic produce inele luminoase şi întunecate (pag. 91). Cum am putea interpreta acest fenomen cu ajutorul teoriei cuantice a luminii, fără a face de loc apel la teoria ondulatorie ? Trimiţînd un foton asupra unui orificiu, este de aşteptat ca pe ecran să apară lumină dacă fotonul trece prin orificiu şi întuneric dacă nu trece prin el. Totuşi noi constatăm apariţia unor inele alterna-tiv luminoase şi întunecate. Am putea încerca să explicăm aceasta astfel : există probabil o interacţiune între bordura orificiului şi foton, dare este cauza apariţiei inelelor de interferenţă. Bineînţeles, această propoziţie nu poate fi privită ca o explicaţie. în cel mai bun caz, ea trasează un program pentru o explicaţie care să ne dea cel puţin speranţa unei înţelegeri viitoare a difracţiei prin interacţiunea dintre materie şi fotoni.
Dar chiar această vagă speranţă ne este spulberată de analiza făcută înainte altui dispozitiv experimental. Să reluăm cazul celor două orificii fine. Lumina omogenă care trece prin ele produce pe ecran franje alternativ luminoase şi întunecate. Cum poate fi

interpretat acest efect din punctul de vedere al teoriei cuantice a luminii ? Am putea raţiona astfel : un foton trece fie printr-un orificiu fie prin celălalt ; în orice caz, dacă un foton (de lumină omogenă) constituie o particulă elementară, nu vedem cum ar putea el să se dedubleze trecînd prin ambele orificii. Dar atunci fenomenul ar trebui să fie exact acelaşi ca în primul caz, adică inele luminoase şi întunecate, nu franje luminoase şi întunecate. Cum se explică atunci că prezenţa celuilalt orificiu poate schimba cu de-săvîrşire aspectul fenomenului ? Căci, după toate aparenţele, ceea ce transformă inelele în franje este orificiul prin care nu trece fotonul, chiar dacă acesta este situat la o distanţă convenabilă de primul. Dar, dacă fotonul se comportă ca un corpuscul al fizicii clasice, el nu poate trece decît printr-un singur orificiu. în aceste condiţii, fenomenul de difracţie rămîne absolut de neînţeles.

Ştiinţa ne obligă să creăm noi idei, noi teorii. Scopul nostru este să dărîmăm zidul contrazicerilor care barează deseori drumul progresului ştiinţific. Toate ideile esenţiale ale ştiinţei s-au născut în lupta dramatică dintre realitate şi încercările noastre de a o înţelege. Avem de-a face, din nou cu o problemă pentru a cărei soluţionare trebuie să facem apel la noi principii. înainte de a înfăţişa încercările fizicii moderne de a explica contrazicerile dintre aspectele cuantic şi cel ondulatoriu ale luminii vom arăta însă că exact aceleaşi dificutăţi apar de îndată ce avem de-a face cu cuantele de materie în locul celor de lumină.

§ 38. SPECTRE LUMINOASE

Ştim că toată materia este constituită, numai dintr-un număr restrîns de specii de particule. Primele particule elementare de materie descoperite au fost electronii; ei sînt totodată şi cuantele elementare de electricitate negativă. Am mai învăţat că anumite fenomene ne obligă să admitem că lumina este compusă din cuante elementare de lumină, diferite pentru lungimi de undă diferite, înainte de a trece mai departe trebuie să discutăm unele fenomene fizice în care joacă un rol esenţial atît materia cit şi radiaţia. Soarele emite o radiaţie pe care o prismă o poate desface în componentele ei. Se obţine astfel spectrul continuu al Soarelui, adică spectrul în care sînt reprezentate toate lungimile de undă cuprinse între cele două extremităţi ale sale. Să luăm acum un alt exemplu. Am mai spus că sodiul incandescent emite lumină omogenă, lumină avind o singură culoare, adică o singură lungime de undă. Dacă înaintea prismei se aşază sodiul incandescent, atunci apare numai o linie galbenă.

în general, dacă înaintea unei prisme se aşază un corp care radiază, atunci lumina pe care o emite el este descompusă în componentele sale, obţinîndu-se astfel spectrul caracteristic al corpului emiţător.

Descărcarea electrică într-un tub care conţine un

gaz este o sursă de lumină, aşa cum se observă în tuburile cu neon folosite pentru reclamele luminoase. Să aşezăm un tub din acestea înaintea unui spectroscop. Spectroscopul este un instrument care lucrează ca o prismă, dar cu mult mai multă precizie şi sensibilitate ; el desface lumina în componentele ei, adică o analizează. Lumina Soarelui, privită prin spectroscop, prezintă un spectru continuu ; în el apar toate lungimile de undă. Dacă izvorul luminos este un gaz prin care trece un curent electric, spectrul are un caracter diferit. în locul unei bande continue multicolore apar pe un fond întunecat linii luminoase distincte. Fiecare dungă, dacă este foarte îngustă, corespunde unei culori anumite sau, în limbajul teoriei ondulatorii, unei lungimi de undă anumite. De exemplu, dacă într-un spectru apar 20 de linii, fiecăreia din ele îi va corespunde unul din cele 20 de numere care vor desemna lungimile de undă. Vaporii diferitelor elemente au sisteme de linii diferite şi, prin urmare, diferite combinaţii de numere care corespund lungimilor de undă din spectrul emis. Nu există două elemente care să aibă acelaşi sistem de linii în spectrul lor caracteristic, după cum nu există două persoane care să aibă amprentele digitale absolut identice. După ce fizicienii au alcătuit un catalog al acestor linii, încetul cu încetul, a devenit evidentă existenţa unor legi, reuşindu-se chiar mai tîrziu, să se înlocuiască printr-o formulă matematică simplă coloanele de numere, în aparenţă fără legătură între ele, care exprimau lungimile de undă ale radiaţiilor emise de un corp dat.

Tot ce s-a spus pînă acum poate fi transpus în limbajul fotonic. Liniile corespund unor lungimi de undă definite, cu alte cuvinte unor fotoni cu energii definite. Prin urmare, gazele luminoase nu emit fotoni de toate energiile posibile ci numai pe cei caracteristici substanţei. Din nou realitatea limitează marele număr de posibilităţi.
Atomii unui element particular, să zicem ai hidrogenului, pot emite numai fotoni de energii diferite. Numai emisia anumitor cuante de energii definite este permisă, toate celelalte fiind interzise. Pentru simplicitate să ad

mitem că un anumit element ar emite o singură linie, adică fotoni de energie riguros determinată. Orice atom este mai bogat în energie înainte de emisie şi mai sărac după aceea sau, altfel exprimat, nivelul lui de energie este mai înalt înaintea emisiei şi mai scăzut după aceea. Din principiul conservării energiei rezultă că diferenţa dintre cele două nivele trebuie să fie egală cu energia fotonilor emişi. Aşadar, faptul că un atom al unui anumit element ar emite radiaţii de o singură lungime de undă, adică numai fotoni de energie perfect determinată, ar însemna că în acel atom sînt permise numai două nivele de energie, emiterea unui foton corespunzînd tranziţiei atomului de la nivelul mai înalt la cel mai scăzut.
Dar, de regulă, în spectrul unui element apar mai multe linii ; fotonii emişi corespund mai multor energii şi nu uneia singure. Cu alte cuvinte, trebuie să admitem că în atomi sînt permise mai multe nivele energetice şi că emisia unui foton corespunde tranziţiei unui atom de la unul din nivelele energetice mai înalte la unul din nivelele mai scăzute. Dar, esenţialul este că nu orice niveî este permis, intrucît în spectrul unui element nu apare orice lungime de undă, adică fotoni de orice energie. în loc să spunem că spectrul unui atom este caracterizat prin anumite linii, prin anumite lungimi de undă definite, putem spune că fiecare atom are anumite nivele de energie definite şi că emisia unei cuante de lumină este asociată cu tranziţia atomului de la unul din aceste nivele energetice la altul. Nivelele de energie nu sînt, de regulă, continue, ci discontinue. Vedem iar că posibilităţile sînt restrînse de către realitate.
Primul care a explicat de ce apar în spectru anumite linii şi nu altele a fost Bohr. Teoria lui, formulată cu 25 de ani în urmă, formează o imagine a atomului care, cel puţin în cazuri simple, permite prezicerea prin calcul a spectrelor elementelor. în cadrul acestei teorii, numere în aparenţă disparate şi lipsite de semnificaţie sînt transformate într-un sistem coerent.
Teoria lui Bohr constituie o etapă intermediară către o teorie mai profundă şi mai generală, numită mecanica ondulatorie sau cuantică. în paginile ce ne-au mai rămas

ne propunem să caracterizăm ideile pricipale ale acestei teorii. înainte de a începe, trebuie să mai amintim un rezultat teoretic şi experimental cu un caracter mai particular. Spectrul nostru vizibil se întinde de la o anumită lungime de 'undă, cea corespunzătoare culorii violete, pînă la cea a culorii roşii. Cu alte cuvinte, energiile fotonilor din spectrul vizibil sînt, întodeauna, cuprinse între cele ale fotonilor din lumina violetă şi roşie. Această limitare este determinată, fără îndoială, numai de proprietăţile ochiului omenesc. Dacă diferenţa energiilor a două nivele este însă destul de mare, atunci se emite un foton ultraviolet, căruia îi corespunde o linie în afara spectrului vizibil. Apariţia ei nu poate fi constatată numai cu ochiul ; pentru aceasta, este nevoie de o placă fotografică.
Razele X sînt compuse tot din fotoni, însă au o energie mult mai mare decît a celor din spectrul vizibil, adică lungimile lor de undă sînt mult mai mici, de mii de ori mai mici, decit cele ale luminii vizibile.
Dar este posibilă determinarea experimentală a unor lungimi de undă atît de mici ? Abia am reuşit să le măsurăm pe ale luminii obişnuite ; am avut nevoie pentru aceasta de obstacole sau de deschideri mici. Dar două găuri, suficient de fine şi de apropiate pentru a produce difracţia luminii obişnuite, ar trebui să fie de multe mii de ori mai mici şi mai apropiate una de alta pentru a produce difracţia razelor X.
Cum putem, dar, măsura lungimea de undă a acestor raze ? Natura însăşi ne vine în ajutor.
Un cristal este o îngrămădire de atomi aşezaţi la distanţe foarte mici unul de altul, cu regularitate desă-vîrşită (fig. 72). Figura noqstră înfăţişează un model simplu de structură

a unui cristal. în locul unor deschideri minuscule avem obstacole extrem de mici, constituite din atomii elementului, aşezaţi foarte aproape unul de altul, într-o ordine absolut regulată. După cum rezultă din teoria structurii cristalelor, distanţele dintre atomi sînt de ajuns de mici pentru a ne putea aştepta ca ele să dea fenomenul de difracţie pentru razele X. Experienţa dovedeşte că, în adevăr, este posibil să producem

difracţia razelor X cu ajutorul acestor obstacole aşa de înghesuite, aşezate intr-o distribuţie tridimensională regulată, caracteristică.
Să presupunem că un fascicul de raze X străbate un
mentale. In planşa III reproducem o singură figură ie difracţie, obţinută prin una din metodele existente. Regăsim inelele luminoase şi întunecate atît de caracteristice pentru fenomenele ondulatorii. în centru se poate vedea raza nedifractată. Dacă între razele X şi placa fotografică nu s-ar fi interpus un cristal ar fi apărut numai punctul luminos din centru. Fotografii de felul acesta permit calcularea lungimelor de undă corespunzătoare spectrelor razelor X ; de altă parte, cunoscînd lungimea ide undă a razelor X se pot trage concluzii cu privire la structura cristalului.
dim trebuie să interpretăm faptul că în spectrele elementelor apar numai anumite lungimi de undă caracteristice ?
Deseori s-a întîmplat ca, în fizică, să fie realizat un
Fig. 72
cristal şl cade apoi pe o placă fotografică ; pe placă se înregistrează, atunci, o figură de difracţie. S-au folosit diferite metode pentru studierea spee^ trelor razelor X şr pentru determinarea lungimii lor de undă din figura de difracţie. Ce s-a spus aici în cîteva cuvinte ar umple tomuri întregi dacă am indica toate amănuntele teoretice şi experi-
§ 39. UNDE DE MATERIE
PLA
NŞA III
(Fotografiată de Loria şi Klinger)
Difracţia undelor electronice.
Teoria cuantelor
215
progres esenţial exploatîndu-se o analogie consecventă între fenomene în aparenţă fără legătură. în aceste pagini am văzut deseori cum idei create şi dezvoltate intr-o ramură a ştiinţei au fost apoi aplicate, cu succes, în altă ramură. Dezvoltarea concepţiilor mecanice şi de cîmp oferă multe exemple de felul acesta. Asocierea unor probleme rezolvate cu altele nerezolvate poate arunca o lumină nouă asupra dificultăţilor ce le întîmpinăm, sugerîndu-ne idei noi. Analogii superficiale care, în fond,
Fig. 73.
nu exprimă nimic, nu sînt greu de stabilit. Dar a descoperi trăsături comune, esenţiale, ascunse de diferenţe exterioare, a construi pe această bază o nouă teorie fructuoasă, este o realizare importantă. Dezvoltarea aşa-numitei mecanici ondulatorii, ale cărei baze le-au pus de Broglie şi Schrodinger în urmă cu mai puţin de 15 ani, este un exemplu tipic de creare a unei teorii fecunde pe baza unei analogii adinei şi fericite.
Drept punct de plecare al expunerii ne va sluji un exemplu clasic care nu are nimic de-a face cu fizica modernă. Să apucăm capătul unui tub de cauciuc foarte lung şi subţire sau al unui resort foarte lung şi să-1 agităm ritmic în sus şi în jos, imprimîndu-i astfel o mişcare oscilatorie. Atunci, cum am văzut în mai multe exemple, datorită oscilaţiei, ia naştere o undă care se propagă în lungul tubului cu o anumită viteză. Dacă am dispune de un tub infinit de lung atunci unda, odată produsă, şi-ar continua nestingherită călătoria ei fără de sfîrşit (fig. 73).
Acum să luăm un alt exemplu ; să fixăm cele două capete ale tubului de mai sus, ori, dacă preferaţi, ale unei coarde de vioară (fig. 74). Ce se întîmplă acum cu o undă care ia naştere la unul din capetele tubului de cauciuc sau al coardei ? Unda îşi începe călătoria ca în exemplul precedent, dar este curînd reflectată de celălalt capăt al

tubului. Avem acum două unde : una produsă prin oscilaţie, cealaltă prin reflexie ; ele înaintează în direcţii opuse şi interferează. Nu va fi prea greu să studiem interferenţa

_ celor două unde determi-
nînd unda unică ce rezultă din suprapunerea lor ; ea se numeşte „undă staţionară". Cei doi termeni „staţionar" şi ..undă" par a se exclude. Vom vedea totuşi numaidecît ^____că asocierea lor este justificată de rezultatul su-Flg* 74 prapunerii a două unde.
Cel mai simplu exemplu de undă staţionară este mişcarea unei coarde fixate la capete, care, cum se vede din fig. 74 este o mişcare alternativă în sus şi în jos. Această mişcare este rezultatul suprapunerii a două unde care înaintează în direcţii opuse. Caracteristica acestei mişcări este că numai cele două puncte
de la extremităţile ei Fig-75
sînt în repaus. Ele se
numesc noduri. Este ca şi cum unda ar fi suspendată între cele două noduri, căci toate punctele coardei ating simultan atît maximurile cît şi minimurile deviaţiei lor.
Am descris doar
^----*^ss. tipul cel mai sim-
V--------^SvT-------- piu de undă staţio-
nară. Există însă şi Fig. 76 altele ; de exemplu
o undă staţionară poate avea trei noduri, cîte unul la cele două capete şi unul la mijloc. în acest caz, trei puncte sînt permanent în repaus. Aruncînd o privire asupra fig. 75 vedem că acum lungimea de undă este jumătate din cea a undei cu două noduri. O undă staţionară poate avea patru

(fig. 76), cinci şi chiar mai multe noduri în fiecare caz., lungimea de undă depinde de numărul de noduri. Acest număr poate fi numai întreg şi poate varia numai în salturi. Afirmaţia : „numărul de noduri într-o undă staţionară este de 3,576" este pur şi simplu absurdă. Aşadar, lungimea de undă poate varia numai discontinuu. în a-ceastă problemă ultraclasică regăsim un aspect familiar nouă din teoria cuantelor. în realitate, unda staţionară produsă, de exemplu, de un violonist este mult mai complicată, ea fiind un amestec de foarte multe unde cu 2„ 3, 4 şi mai multe noduri, cu lungimi de undă diferite.. Fizica este în măsură să descompună un asemenea amestec în undele staţionare simple din care este compus. Folosind terminologia noastră de mai sus, am putea spune că o coardă care oscilează are spectrul ei întocmai ca un element care emite o radiaţie şi că, întocmai ca în cazul spectrului unui element, numai anumite lungimi de undă sînt permise, toate celelalte fiind interzise.
Am stabilit astfel o asemănare între coarda care oscilează şi atomul care emite o radiaţie. Să tragem acum concluziile care decurg din această analogie, oricît de ciudată s-ar părea ea, încercînd să o ducem pînă la capăt, o dată ce am acceptat-o. Atomii fiecărui element sînt compuşi din particule elementare, cea mai grea constituind nucleul, cele mai uşoare, electronii. Un asemenea sistem de particule se comportă ca un mic instrument acustic în care se produc unde staţionare.
Dar o undă staţionară este rezultatul interferenţei a două şi, în general, chiar a mai multor unde progresive. Prin urmare, dacă analogia noastră are un sîmbure de adevăr, unei unde progresive trebuie să-i corespundă un sistem mai simplu decît atomul. Care este însă cel mai simplu sistem ? în lumea noastră materială nimic nu poate fi mai simplu decît un electron, o particulă elementară, asupra căreia nu acţionează nici o forţă, adică un electron în repaus sau în mişcare uniformă. Acum, veriga următoare in lanţul analogiei noastre rezultă imediat :
electron în mişcare uniformă —► unde de lungime de undă anumită.

Aceasta a fost ideea nouă şi îndrăzneaţă a lui de Bro-
glie.
Am arătat mai înainte că există fenomene în care lumina manifestă un caracter ondulatoriu şi altele în care manifestă un caracter corpuscular. După ce ajunsesem să considerăm, mai presus de îndoială, că lumina este o undă, am constatat, spre nedumerirea noastră, că, in unele cazuri, de exemplu în cazul efectului fotoelectric, ea se comportă ca o ploaie de fotoni. Pentru electroni situaţia este exact contrarie. Ne-am deprins cu ideea că electronii sînt particule, cuante elementare de electricitate şi materie. Mai mult, le-am determinat sarcina şi masa. Ei bine, dacă ideea lui de Broglie

conţine o parte de adevăr atunci trebuie să existe fenomene în care materia să-şi dea la iveală caracterul ei ondulatoriu. La prima vedere, această concluzie, dedusă din analogia acustică, pare bizară şi de neînţeles. Ce poate avea de-a face un corpuscul în mişcare cu o undă ? Dar, aceasta nu ar fi prima dificultate de felul acesta pe care o întîmpinăm în fizică. Am întîlnit aceeaşi problemă în domeniul fenomenelor optice.
iRolul esenţial în elaborarea unei teorii fizice îl joacă ideile fundamentale. Tratatele de fizică sînt pline de formule matematice complicate. Dar punctul de plecare al oricărei teorii fizice îl constituie ideile, nu formulele. Ulterior, ideile trebuie să îmbrace forma matematică a unei teorii cantitative pentru a permite confruntarea cu experienţa. Situaţia aceasta poate fi ilustrată chiar de exemplul problemei cu care ne ocupăm acum. Presupunerea principală a teoriei în discuţie este că electronul în mişcare uniformă se va comporta, în anumite fenomene, ca o undă. Să presupunem că un electron sau o ploaie de electroni, toţi avînd aceeaşi viteză, se mişcă uniform. Masa, sarcina şi viteza fiecărui electron individual sînt cunoscute. Dacă ne-am propus să asociem într-un fel oarecare conceptul de undă cu mişcarea uniformă a unui electron sau a unor electroni, prima noastră întrebare trebuie să fie : care este lungimea de undă corespunzătoare electronului ? Aceasta este o întrebare cantitativă şi, pentru a-i da un răspuns, trebuie construită o teorie mai mult

sau mai puţin cantitativă, Ei bine, sarcina aceasta s-a dovedit foarte simplă : simplicitatea matematică a lucrării lui de Broglie, în care se lămureşte această chestiune, este pur şi simplu uimitoare. în perioada cînd elabora a-ceastă teorie, tehnica matematică a altor teorii fizice era, comparativ, foarte subtilă şi complicată. Aparatul matematic folosit în teoria undelor de materie este extrem de simplu şi elementar, dar ideile ei fundamentale sînt adinei şi bogate in consecinţe.
Am arătat mai înainte, în cazul undelor de lumină şi al fotonilor, că orice afirmaţie formulată în limbajul ondulatoriu poate fi tradusă în limbajul fotonilor, adică al corpusculelor de lumină. Acest lucru este valabil şi pentru undele electronice. Pentru electronii în mişcare uniformă, se cunoaşte limbajul corpuscular. Dar orice afirmaţie formulată în limbajul corpuscular trebuie să poată fi tradusă în limbajul ondulatoriu, întocmai ca în cazul fotonilor. Regulile de traducere ne-au fost date de două fire conducătoare. Primul este analogia dintre undele de lumină şi undele electronice, adică dintre fotoni şi electroni, care ne va permite să folosim, în cazul materiei, a-ceeaşi metodă de traducere ca pentru lumină. Al doilea fir conducător derivă din teoria relativităţii restrînse. Legile naturii trebuie să fie invariante faţă de transformarea Lorentz, nu faţă de transformarea clasică. Aceste două fire conducătoare determină, împreună, lungimea de undă care corespunde unui electron în mişcare. Pentru un electron care se deplasează, de exemplu, cu o viteză de 16 000 km/s, rezultă din teorie o lungime de unidă — uşor calculabilă — care cade în domeniul lungimilor de undă ale razelor X. Prin urmare, dacă caracterul ondulatoriu al materiei poate fi pus în evidenţă, atunci demonstrarea lui experimentală trebuie făcută ca şi pentru razele X.
Să ne imaginăm un fascicul de electroni care se deplasează uniform, cu o viteză dată sau, în terminologia ondulatorie, o undă electronică omogenă şi să presupunem că ea cade pe un cristal foarte subţire care joacă rolul unei reţele de difracţie. Să admitem că distanţele dintre obstacolele pe care le reprezintă particulele cris

talului sînt de ajuns de mici pentru a se produce difracţia razelor X. în cazul acesta, ne putem aştepta la un efect similar pentru undele electronice de lungime de undă de acelaşi ordin de mărime. O placă fotografică ar trebui să înregistreze difracţia unor asemenea unde electronice care au străbătut pătura subţire de cristal. Experienţele confirmă efectiv, în mod neîndoielnic, fenomenul difracţiei undelor electronice, ceea ce constituie unul din cele mai mari succese ale teoriei. Asemănarea dintre difracţia unei unde electronice şi cea a unor raze X este deosebit de\ evidţentă, cum rezultă din compararea figurilor de difracţie din planşa a treia. Ştim că o asemenea fotografie ne permite să determinăm lungimea de undă a razelor X. Aceeaşi metodă este valabilă şi pentru undele electronice. Figura de difracţie ne dă lungimea undei de materie şi

concordanţa cantitativă perfectă dintre teorie şi experienţă confirmă, în mod strălucit, raţionamentul nostru.
Acest rezultat are insă drept efect lărgirea şi adinci-rea dificultăţilor noastre, ceea ce se poate ilustra limpede printr-un exemplu asemănător cu cel dat pentru o undă de lumină. Un fascicul de electroni proiectat pe o deschidere foarte mică se va difracta întocmai ca o undă de lumină pe placa fotografică. Vor apărea inele luminoase şi întunecate. Să admitem că ar exista speranţa de a explica acest fenomen prin interacţiunea dintre electroni şi bordura orificiului, deşi această explicaţie nu prea pare posibilă. Cum rămîne însă atunci cu cazul a două deschideri, unde în loc de inele apar franje ? Cum este posibil ca prezenţa unui al doilea orificiu să schimbe cu desăvîrşire fenomenul ? Electronul este indivizibil şi evident nu poate să treacă decît printr-unul singur din cele două orificii. De unde ar putea să ghicească un electron care trece printr-una din deschideri că puţin mai încolo există o a doua deschidere ?
Mai înainte ne întrebasem : ce este lumina ? Este d ploaie de corpuscule sau o undă ? Acum este cazul să întrebăm : Ce este materia ? Ce este un electron ? El este o particulă sau o undă ? Cînd trece printr-un cîmp electric sau magnetic exterior, electronul se comportă ca o particulă. Cînd este difractat de un cristal, se comportă

ca o undă. Vedem deci că în cazul cuantelor elementare de materie întîmpinăm aceeaşi dificultate ca în cazul cuantelor de lumină. Una dintre chestiunile fundamentale ridicate de progresul recent al ştiinţei este cum să împăcăm aceste două aspecte contradictorii : cel de materie şi cel de undă. Aceasta este una dintre acele dificultăţi fundamentale care o dată formulate, în cele din urmă, trebuie să determine un progres ştiinţific. Fizica a încercat sa soluţioneze această problemă. Viitorul singur va decide dacă soluţia sugerată de fizica modernă este provizorie sau de durată.

§ 40. UNDE DE PROBABILITATE
s

Potrivit mecanicii clasice, dacă noi cunoaştem poziţia şi viteza unui punct material, la un moment dat, precum şi forţele exterioare ce acţionează asupra lui, se poate prezice, din legile mecanicii, întreaga lui traiectorie ulterioară. Afirmaţia : „în cutare moment punctul material are cutare viteză şi poziţie" are o semnificaţie bine precizată în mecanica clasică. Dacă această afirmaţie şi-ar pierde conţinutul, atunci, raţionamentul nostru (pag. 29) privitor la precizarea traiectoriei ar cădea.
Pe la începutul secolului al XIX-lea, fizicienii încercaseră să reducă toată fizica la acţiunea unor forţe simple asupra unor particule materiale, avînd poziţii şi viteze determinate în fiecare moment. Să ne amintim cum am descris mişcarea cînd am analizat mecanica la începutul călătoriei noastre prin domeniul problemelor fizice : în lungul unui drum bine definit am figurat mai întîi puncte care indicau poziţia exactă a corpului la un moment dat, şi apoi vectori tangenţi care indicau orientarea şi valoarea vitezelor. Acestea sînt simple şi convingătoare. Totuşi nu le putem repeta în cazul cuantelor elementare de materie, adică al electronilor sau al cuantelor de energie — adică al fotonilor. Deplasarea unui foton sau electron nu o putem reprezenta grafic în felul în; care am reprezentat mişcarea in mecanica clasică. Exemplul celor două orificii demonstrează limpede a

ceasta : electronul şi fotonul par a trece prin amîndouă deschiderile. Prin urmare, este imposibil să descriem traiectoria unui electron sau a unui foton în modul vechi, clasic. Fireşte, trebuie să presupunem existenţa unor procese elementare, ca de pildă trecerea electronilor sau fotonilor prin orificiu. Existenţa cuantelor elementare de materie şi energie nu poate fi pusă la îndoială, dar legile elementare nu pot fi formulate precizînd poziţiile şi vitezele din fiecare moment în modul simplu al mecanicii clasice.
Să încercăm deci altă soluţie. Să repetăm de un număr foarte mare de ori acelaşi proces elementar. Să trimitem, unul după altul, electronii în direcţia orificiilor, Cuvîntul „electron" este folosit aici pentru fixarea ideilor ; raţionamentul este valabil şi pentru fotoni. Repetăm, deci, experienţa noastră de foarte multe ori, în mod perfect identic : electronii se îndreaptă cu a-ceeaşi viteză in direcţia celor două deschideri. Aproape nu trebuie să amintim că aceasta este o experienţă idealizată care nu poate fi efectuată în realitate,

dar care poate fi foarte bine imaginată : nu putem proiecta electroni sau fotoni izolaţi cum ies gloanţele din ţeava unei puşti.
Rezultatul acestei experienţe trebuie să fie bine cunoscutele inele întunecate şi luminoase, cînd avem o singură deschidere, şi dungi întunecate şi luminoase, cînd avem două deschideri. Dar cazul acesta se deosebeşte fundamental de cel al unui singur electron. Raţionînd asupra electronului individual, rezultatul experimetal este de neînţeles. în cazul repetării experienţei, interpretarea devine însă mai simplă : franjele luminoase apar acolo unde cad mulţi electroni, cele mai puţin luminoase unde cad mai puţini electroni, iar un punct întunecat de tot, unde nu cad de loc electroni. Bineînţeles, nu avem dreptul să presupunem că toţi electronii trec prin aceeaşi gaură. Dacă ar fi aşa, ar fi absolut indiferent dacă cealaltă gaură este sau nu obturată. Dar ştim că, acoperind cea-lalată gaură, fenomenul se schimbă. întrucit o particulă este indivizibilă, nu putem admite că ea trece prin amin

două orificiile. Dar faptul că experienţa a fost repetată de multe ori sugerează o altă interpretare : probabil că unii din electroni trec prin prima deschidere, ceilalţi prin cea de a doua. Nu ştim de ce un electron anumit ar alege o deschidere anumită, dar rezultatul repetării experienţei trebuie să fie participarea ambelor orificii la transmiterea electronilor de la izvor la ecran. Dacă ne mărginim să deducem ce se întîmplă cu mulţimea de electroni la repetarea experienţei fără a ne preocupa de comportarea particulelor individuale, atunci diferenţa dintre cazul cînd se formează inele şi cel cînd se formează franje devine inteligibilă. Din discutarea unui şir de experienţe a luat naştere o nouă idee, cea a ansamblului de particule în care fiecare particulă, luată în parte, se compoartă într-un mod imprevizibil. Traiectoria unui electron izolat nu o putem prevedea ; putem, totuşi, prezice că, în cele din urmă, se vor obţine dungi luminoase şi întunecate pe ecran.
Să părăsim pentru scurt timp fizica cuantică.
în fizica clasică am văzut că, dacă ştim poziţia şi viteza unui punct material la un moment dat precum şi forţele care acţionează asupra lui, putem să prezicem traiectoria lui ulterioară. Am văzut, de asemenea, cum punctul de vedere mecanicist se aplică în teoria cinetică a materiei. Dar," din consideraţiile făcute în cadrul acestei teorii, s-a născut o idee nouă. Pentru înţelegerea celor ce urmează ne va fi util să sezisăm perfect această idee.
Să presupunem că avem un vas care conţine un gaz. Dacă ne-am propune să precizăm mişcarea tuturor particulelor sale ar trebui să determinăm mai întîi stările lor iniţiale, adică poziţiile şi vitezele iniţiale ale tuturor parti-lelor. Chiar dacă acest lucru ar fi posibil, nu ne-ar ajungi o viaţă de om pentru a însemna rezultatul pe hîrtie, atît este de mare numărul particulelor care ar trebui catalogate. Dacă am încerca, în problema aceasta, să ne servim de metodele cunoscute ale mecanicii clasice pentru a calcula poziţiile finale ale particulelor, dificultăţile ar fi de neînvins. în principiu, ar fi posibil să folosim metoda a-plicată, de exemplu, mişcării planetelor, în practică ea este însă neîntrebuinţabilă şi trebuie să cedeze locul rae

todei statistice. Această metodă ne dispensează de a cunoaşte exact starea iniţială. Ştiind mai puţin despre sistem la un moment dat, vom fi mai puţin in stare să a-firmăm ceva despre trecutul sau viitorul lui. Destinul unei particule individuale a gazului devine indiferent ; problemă noastră este de altă natură. Nu întrebăm de exemplu, „care este viteza fiecărei particule în acest moment ?" Ci : „Cîte particule au o viteză cuprinsă între 300 şi 400 metri pe secundă ?" Nu ne preocupăm de indivizi. Ceea jce căutăm să determinăm sînt valorile medii care caracterizează întregul ansamblu. Este limpede că metoda .statistică de raţionament are un sens numai dacă sistemul constă dintr-un număr mare de indivizi.
Aplicînd metoda statistică nu putem prevedea comportarea unui individ dintr-o mulţime. Putem, totuşi, prezici şansa, probabilitatea ca el să se comporte într-un anumit mod. Dacă legile noastre statistice ne spun de exemplu că o treime din particule au o viteză cuprinsă între 300 şi 400 metri pe secundă, aceasta înseamnă că, repetînd observaţiile noastre asupra unui număr mare de particule, vom obţine efectiv această medie sau,

altfel ^exprimat, că probabilitatea de a găsi o particulă cu viteza cuprinsă în aceste limite este de 1/3.
Asemănător, a cunoaşte media natalităţii unei mari comunităţi de oameni nu înseamnă a şti dacă cutare familie are sau nu un copil. Aceasta înseamnă a cunoaşte un rezultat statistic in care indivizii nu joacă nici un rol.
înregistrînd numerele de circulaţie ale multor automobile vom stabili în scurt timp că o treime din aceste numere sînt divizibile prin 3. Aceasta nu ne dă însă posibilitatea de a prevedea dacă numărul automobilului care trece în clipa de faţă are această însuşire : legile statistice pot fi aplicate numai unor colective mari, dar nu şi membrilor individuali.
Să revenim acum la problema noastră cuantică.
Legile fizicii cuantice au un caracter statistic Aceasta înseamnă că ele nu se referă la un sistem izolat ci la un ansamblu de sisteme identice. Ele nu pot fi verificate prin măsurări asupra unui individ, ci numai printr-o serie de măsurări repetate.

Dezintegrarea radioactivă, accesibilă observaţiilor noastre, constă din numeroase evenimente de acelaşi tip. Fizica cuantică încearcă să formuleze legile care guvernează această transmutare spontană a unui element în .altul. Ştiind, de exemplu, că în interval de 1 600 de ani, jumătate dintr-un gram de radiu se va dezintegra şi jumătate va rămîne, putem prevedea aproximativ citi atomi se vor dezintegra într-o jumătate de oră. Totuşi, chiar într-o expunere teoretică nu putem preciza de ce tocmai cutăror atomi li s-a împlinit sorocul. Cunoştinţele noastre actuale nu ne permit să desemnăm atomii individuali condamnaţi să se dezintegreze. Soarta unui atom nu depinde de vîrsta lui. Nu cunoaştem cîtuşi de puţin legea care guvernează comportarea lor individuală. Se pot formula numai legi statistice, legi care guvernează ansambluri mari de atomi.
Să luăm un alt exemplu. Lumina emisă de un gaz, privită printr-un spectroscop, prezintă linii de anumite lungimi de undă, Apariţia unui grup de anumite lungimi de undă este caracteristică pentru acele fenomene atomice, in care este pusă în evidenţă existenţa cuantelor elementare. Dar problema aceasta are şi un alt aspect. Unele din liniile spectrale sînt foarte accentuate, altele sînt mai slabe. O linie accentuată indică emiterea unui număr relativ mare, o linie slabă (fluă) a unui număr relativ mic de fotoni aparţinînd lungimii de undă corespunzătoare. Teoria face şi în cazul acesta, numai afirmaţii de natură statistică. Fiecare linie corespunde unei tranziţii de la un nivel energetic mai înalt la unul mai jos. Teoria ne indică numai probabilitatea fiecărei tranziţii posibile dar nu ne spune nimic despre tranziţia efectivă a atomului individual. Teoria se verifică strălucit deoarece toate aceste fenomene sînt determinate de mulţimi mari şi nu de indivizi izolaţi.
S-ar părea că noua fizică cuantică se aseamănă în-trucîtva cu teoria cinetică a materiei, de vreme ce amîndouă sînt de natură statistică şi amîndouă se referă la un număr mare de particule. Dar aceasta nu corespunde realităţii. Este foarte important să înţelegem şi diferenţele, nu numai asemănările acestei analogii. Asemănarea dintre teoria cinetică a materiei şi fizica cuantică consistă,

mai cu seamă, în caracterul lor statistic. Care sînt însă diferenţele dintre ele?
Dacă vrem să ştim cîţi bărbaţi şi cîte femei trecuţi de 20 de ani trăiesc într-un oraş, trebuie să-i cerem fiecărui cetăţean să completeze un formular care să conţină rubricile : sex masculin, sex feminin şi vîrsta. Admiţînd oă toate răspunsurile sînt corecte, numărîndu-le după clasarea lor, vom stabili un rezultat de natură statistică. Numele şi adresa fiecărui individ in parte nu contează, deşi informaţia noastră statistică a fost dobîndită trecînd în revistă cazurile individuale. în mod asemănător,, în teoria cinetică a materiei legile statistice care guvernează ansamblul sînt dobîndite pe bază unor legi individuale.
Dar în fizica cuantică situaţia este cu totul alta. Aici legile statistice sînt date direct. Legile individuale nu sînt luate în considerare. în exemplul cu fotonul sau electronul şi cele două deschideri am văzut că nu putem preciza mişcarea posibilă în spaţiu şi în timp a unei particule elementare, cum! făcusem în fizica clasică. Fizica cuantică abandonează legile individuale ale particulelor elementare şi enunţă direct lepile statistice care

guvernează ansamblurile. Este imposibil să precizăm, pe baza fizicii cuantice, poziţiile şi vitezele unei particule elementare sau să-i prezicem traiectoria, ca în fizica clasică. Fizica cuantică are de a face numai cu ansambluri şi legile ei sînt pentru mulţimi şi nu pentru indivizi.
Necesitatea necruţătoare şi nu speculaţia sau dorinţa de mai nou ne constrîng să ne schimbăm concepţia noastră clasică. Dificultăţile aplicării concepţiei vechi au fost schiţate numai pentru un singur exemplu, cel al fenomenelor de difracţie. Am putea însă cita multe altele, la fel de elocvente. Schimbările de concepţie ne sînt impuse necontenit de încercările noastre de a înţelege realitatea. Dar de fiecare dată viitorul îşi rezervă dreptul de a hotărî dacă am găsit singura soluţie posibilă sau dacă există o modalitate mai bună de a înlătura dificultăţile.
Am fost deci nevoiţi să părăsim descrierea cazurilor individuale, ca evenimente obiective în spaţiu şi timp, înlocuind-o cu legi de natură statistică. Aceasta este esenţa fizicii cuantice moderne.
Teoria cuantelor
227
Pînă acum, ori de cîte ori am introdus o realitate fizică nouă, de plidă cîmpul electromagnetic, cîmpul gravitaţional, am încercat să indicăm, într-o formă generală, caracteristicile ecuaţiilor prin care erau formulate matematic ideile respective. Vom face acelaşi lucru cu fizica cuantică, referindu-ne numai foarte pe scurt la lucrările lui Bohr, de Broglie, Schrodinger, Heisenberg, Dirac şi Born.
Să considerăm cazul unui electron. El poate fi supus acţiunii unui cîmp electromagnetic exterior oarecare, sau poate fi liber de orice acţiune exterioară. Fie că se mişcă, de exemplu, în cîmpul unui nucleu atomic, fie că se di-fractă pe un cristal, fizica cuantică ne învaţă să formulăm ecuaţiile matematice corespunzătoare.
Am stabilit că există o asemănare între o coardă vibrantă, membrana unei tobe, un instrument de suflat sau oricare alt instrument acustic, pe de o parte, şi un atom care radiază, pe de altă parte. Asemănarea aceasta există şi între ecuaţiile matematice care guvernează problemele acustice şi cele care guvernează problemele fizicii cuantice. Dar, interpretarea fizică a mărimilor care intervin în cele două cazuri este cu totul diferită. Mărimile fizice care descriu coarda vibrantă şi atomul care radiază au un caracter cu totul diferit, în ciuda asemănării formale a acestor ecuaţii. în cazul coardei vibrante ne întrebăm care este deplasarea din poziţia1 normală a unui punct arbitrar, la un moment oarecare. Pentru a răspunde, este de ajuns să cunoaştem forma coardei într-un singur moment al vibraţiei ei, deoarece, în cazul acesta, din ecuaţiile matematice ale coardei vibrante rezultă deplasarea ei din poziţia normală în orice alt moment. Faptul că, la un moment dat, fiecărui punct al coardei îi corespunde o deplasare anumită din poziţia normală este exprimat mai riguros astfel : pentru fiecare moment, deplasarea de la valoarea normală este o funcţiune de coordonatele coardei. Toate punctele coardei formează un continuum unidimensional; deplasarea este o funcţiune definită în a-cest continuum unidimensional deoarece ea poate fi calculată din ecuaţiile coardei vibrante. în mod analog, în cazul unui electron avem o anu
228
Evoluţia fizicii
mită funcţiune pentru fiecare punct al spaţiului şi pentru fiecare moment. Vom numi această funcţie undă de pro-babilitate. în analogia noastră, unda de probabilitate co-respunde abaterii de la poziţia normală din problema a-custică. Unda de probabilitate este, în fiecare moment, o funcţiune definită pe un continuum tridimensional, în vreme ce în cazul corzii deplasarea era, în fiecare moment, o funcţiune definită pe un continuum unidimensional. Unda de probabilitate constituie un catalog al cunoştinţelor noastre asupra sistemului cuantic studiat şi ne permite să răspundem la toate problemele, evident, statistice referitoare la acest sistem. Ea nu ne indică, de exemplu, poziţia sau viteza electronului in fiecare moment, deoarece o asemenea problemă nu are sens în fizica cuantică. In schimb ea ne indică probabilitatea de a întîlni un electron într-un punct anumit sau ne spune unde avem cea mai mare şansă de a-1 întîlni. Rezultatul nu se referă la o măsurare ci la un număr mare de măsurări. Cu alte cuvinte, ecuaţiile fizicii cuantice determină unda de probabilitate, după cum ecuaţiile lui Maxwell determină cîmpul electromagnetic şi ecuaţiile gravitaţionale determină cîmpul gravitaţional. Legile fizicii cuantice sînt tot legi de structură. Dar semnificaţia conceptelor fizice legate de

aceste ecuaţii ale fizicii cuantice este mult mai abstractă decît in cazul cîmpului electromagnetic şi gravitaţional ; ele ne furnizează numai mijloacele matematice de a soluţiona probleme cu caracter statistic.
Pînă acum am considerat electronul într-un cîmp exterior. Dar dacă am avea de-a face nu cu uni electron, sarcina cea mai mică posibilă, ci cu o sarcină considerabilă care conţine miliarde de electroni, atunci am putea să nu ţinem cont de toată teoria cuantică şi să tratăm problema potrivit fizicii vechi, precuantice. Vorbind, de exemplu, despre curentul care trece printr-o sîrmă, de un conductor încărcat, de o undă electromagnetică, putem folosi vechea noastră fizică simplă conţinută în ecuaţiile lui Maxwell. Nu mai putem face aceasta cînd avem de a face cu efectul fotoelectric, cu intensitatea liniilor spectrale, cu radioactivitatea, cu difracţia undelor electronice şi cu multe alte fenomene în care se manifestă

caracterul cuantic al materiei şi energiei. în cazul acesta, ca să zicem aşa, trebuie să urcăm încă un etaj. în vreme ce în fizica clasică vorbeam despre poziţiile şi vitezele unei particule, acum trebuie să considerăm unde de probabilitate într-un continuum tridimensional, care corespunde problemei unei singure particule.
Fizica cuantică ne dă prescripţiile ei pentru tratarea unei probleme dacă ştim să tratăm o problemă analogă din punct de vedere al fizicii clasice.
Pentru o singură particulă elementară, electron sau foton, avem unda de probabilitate într-un continuum tridimensional, undă care caracterizează comportarea statistică a sistemului în cazul unor experienţe repetate des. Cum rămîne însă cînd avem de-a face nu cu una ci cu două particule care interacţionează, de exemplu cu doi electroni, un electron şi un foton sau un electron şi un nucleu? Nu putem să le tratăm independent descriind pe fiecare printr-o undă de probabilitate în trei dimensiuni, tocmai din cauza interacţiunii lor. Nu este greu să ne dăm seama cum poate fi descris în fizica cuantică un sistem compus din două particule care interacţionează. Nu avem decît să coborîm la etajul inferior, să ne întoarcem pentru o clipă la fizica clasică. Poziţia a două puncte materiale în spaţiu este caracterizată, în fiecare moment, prin şase numere, cîte trei pentru fiecare punct. Toate poziţiile posibile ale celor două puncte materiale formează deci un continuum şasedimensional şi nu un continuum tridimensional ca în cazul unui singur punct. Urcînd acum din nou la etajul superior, la fizica cuantică, corespondentul este unda de probabilitate într-un continuum şasedimensional şi nu într-un continuum tridimensional ca în cazul unei particule. Asemănător pentru trei, patru sau mai multe particule, undele de probabilitate respective vor fi funcţiuni definite într-un continuum cu nouă, douăsprezece sau mai multe dimensiuni.
Aceasta arată limpede că undele de probabilitate sînt mai abstracte decît cîmpul electromagnetic şi gravitaţional care există şi se propagă în spaţiul nostru tridimen - sional. Continuumul multidimensional formează domeniul de definiţie pentru undele de probabilitate şi numai pen

tru o singură particulă trebuie ca numărul de dimensiuni să fie egal cu acela al spaţiului fizic. Singura semnificaţie fizică a undei de probabilitate este că ea ne permite, atît în cazul mai multor particule cît şi în cazul uneia singure, să soluţionăm acele probleme statistice care au sens. Astfel, de exemplu, pentru un electron putem întreba care este probabilitatea de a-1 întîlni într-un anumit punct? în cazul a două particule, ne-am putea întreba care este probabilitatea de a întîlni, la un moment dat, cele două particule în două puncte anumite?
Primul pas cu care ne-am abătut de la fizica clasică a fost părăsirea descrierii cazurilor individuale ca evenimente obiective în spaţiu şi timp, şi adoptarea metodei statistice furnizată de unda de probabilitate. O dată ce am păşit pe această cale, sîntem obligaţi să ne adîn-cim în abstracţie. Trebuie să introducem unde de probabilitate cu multe dimensiuni, corespunzătoare problemei mai multor particule.
Pentru simplicitate, să numim acum fizică clasică tot ce nu este mecanică cuantică. Fizica clasică şi cea cuantică se deosebesc radical. Obiectivul fizicii clasice este descrierea unor obiecte care există în spaţiu şi formularea legilor care guvernează schimbările lor în timp. Dar fenomenele care pun în evidenţă dubla natură, de particulă şi de undă, afît a

materiei cît şi a radiaţiei, caracterul evident statistic al proceselor elementare, cum ar fi dezintegrarea radioactivă, difracţia, emisia liniilor spectrale şi multe altele, ne-au constrîns să părăsim această concepţie. Fizica cuantică nu-şi propune să descrie obiecte individuale în spaţiu şi variaţiile lor în timp. în fizica cuantică nu este loc pentru afirmaţii de tipul : obiectul acesta este „aşa şi pe dincolo" sau „are cutare proprietate", în locul lor avem afirmaţii de tipul : există cutare probabilitate ca un obiect individual să fie „aşa şi pe dincolo" sau să aibă „cutare proprietate". în fizica cuantică nu este loc pentru legi care guvernează variaţiile în timp ale unui obiect individual. în locul lor avem legi care guvernează variaţiile în timp ale probabilităţii. Numai această schimbare fundamentală introdusă în fizică de teoria cuantelor a făcut posibilă explicarea adecuată a caracterului vădit discontinuu şi statistic al evenimentelor din do

meniul fenomenelor în care îşi manifestă existenţa cuantele de materie şi radiaţie. Apar însă probleme şi mai grele care nu au fost încă rezolvate pe deplin nici pînă astăzi. Vom menţiona numai unele din aceste probleme nerezolvate. Ştiinţa nu este şi nu va fi niciodată o carte terminată ; fiecare progres important ridică noi probleme. Fiecare dezvoltare ridică, cu timpul, dificultăţi şi mai adînci.

Ştim că în c&zul simplu al uneia sau a mai multor particule, putem trece de la descrierea clasică la cea cuantică, de la descrierea obiectivă a evenimentelor în spaţiu şi în timp la undele de probabilitate. Dar să ne amintim noţiunea de cîmp extrem de importantă în fizica clasică. Cum putem descrie interacţiunea dintre cuantele elementare de materie şi cîmp? Dacă pentru descrierea cuantică a zece particule este necesară o undă de probabilitate definită într-un spaţiu cu treizeci de dimensiuni, atunci pentru descrierea cuantică a unui cîmp ar fi nedesară o undă de probabilitate definită într-un spaţiu cu un număr infinit de dimensiuni. Trecerea de la conceptul clasic de cîmp la problema cuantică corespunzătoare, a undelor de probabilitate, reprezintă un pas foarte greu. în cazul de faţă, a urca un etaj nu este o sarcină uşoară şi toate soluţiile acestei probleme propuse pînă acum trebuie considerate nesatisfădătoare. Mai există încă o problemă fundamentală. în toate raţionamentele noastre privitoare la trecerea de la fizica clasică la cea cuantică am făcut uz de descrierea veche, prerelativistă, în care spaţiul şi timpul erau tratate separat. Or, dacă luăm ca punct de plecare descrierea clasică propusă de teoria relativităţii, atunci trecerea la problema cuantică se complică şi mai mult. Problema aceasta a fost atacată de fizica modernă, dar soluţia ei este încă departe de a fi completă şi satisfăcătoare. Construirea unei fizici consistente a particulelor grele cari alcătuiesc nucleele întîm-pină, de asemenea, dificultăţi. în ciuda abundenţei datelor experimentale şi a numeroaselor încercări de a arunca lumină asupra problemelor fizicii nucleare, în domeniul a-cesta bîjbîim încă în întuneric chiar în problemele fundamentale.

Fără îndoială că fizica cuantică a explicat o mare varietate de fapte, în majoritatea cazurilor realizîndu-se o concordanţă strălucită între teorie şi observaţie. Noua fizică cuantică ne îndepărtează şi mai mult de vechea concepţie mecanicistă şi o revenire la vechile poziţii pare mai-puţin probabilă ca oricînd. Totuşi, nu există îndoială asupra faptului că fizica cuantică trebuie să rămînă bazată tot pe două concepte : pe materie şi pe cîmp. Ea este, în acest sens, o teorie dualistă şi nu poate duce nici cu un pas mai aproape de realizare vechea noastră problemă de a reduce totul la conceptul de cîmp. Dezvoltarea viitoare se va face oare pe făgaşul trasat de fizica cuantică sau se vor introduce noi idei revoluţionare în fizică? Va face drumul progresului o nouă cotitură cum a mai făcut de atîtea ori în trecut?

în cursul anilor din urmă, toate dificultăţile fizicii cuantice au fost concentrate în jurul a cîtorva puncte principale. Fizica aşteaptă cu nerăbdare înlăturarea lor. Dar nu avem nici un mijloc de a prevedea cînd şi în ce sens se vor risipi complicaţiile actuale.

§ 41. FIZICA ŞI REALITATEA

Care sînt concluziile generale ce se desprind din dezvoltarea fizicii aşa cum a fost ea schiţată aici, sub forma expunerii ideilor fundamentale?

Ştiinţa nu este asemenea unei colecţii de legi, un catalog de fapte disparate Ea este o creaţie a minţii omeneşti, făurită din idei şi noţiuni liber inventate. Teorile fizice încearcă să ne dea o imagine a realităţii şi să stabilească legătura ei cu lumea vastă a impresiilor

noastre. Aşadar, construcţiile minţii noastre nu sînt justificate decît în măsura şi în sensul în care teoriile noastre reuşesc să realizeze această legătură.
Am cunoscut realităţi noi create de progresul fizicii. Dar acest lanţ al creaţiei poate fi urmărit mult în afara punctului de plecare al fizicii. Unul dintre conceptele cele mai primitive este cel de obiect. Noţiunile de copac, calr corp material oarecare, sînt creaţii elaborate pe baza experienţei, chiar dacă impresiile din care derivă au un

caracter primar în comparaţie cu lumea fenomenelor fizice. O pisică care se joacă cu un şoarece îşi creează şi ea realitatea ei primară, printr-un proces mintal. Faptul că pisica reacţionează asemănător faţă de fiecare şoarece care-i iese în cale denotă că ea îşi creează noţiuni şi teorii care o călăuzesc în lumea ei proprie de impresii sensibile.
„Trei copaci'* reprezintă un lucru diferit de „doi copaci" ; de asemenea „doi copaci" reprezintă un lucru diferit de „două pietre". Prin urmare noţiunile corespunzătoare numerelor pure 2, 3, 4..., desprinse de obiectele din care au derivat, sînt creaţii raţionale, care descriu realitatea lumii noastre.
Sentimentul subiectiv (psihologic) de timp ne dă posibilitatea să ne ordonăm impresiile, să stabilim dacă un eveniment precede un altul. Dar a lega de fiecare moment un număr cu ajutorul unui ceasornic, a privi timpul ca un continuum unidimensional reprezintă o adevărată invenţie ; tot astfel şi conceptele de geometrie euclidiană şi neeuclidiană, precum şi interpretarea spaţiului nostru ca un continuum tridimensional.
Fizica a început, în fapt, cu inventarea masei, a forţei şi a sistemului inerţial. Aceste concepte sînt toate invenţii libere. Ele au condus la formularea concepţiei mecaniciste. Pentru fizicianul de la începutul secolului al XIX-lea realitatea lumii exterioare se reducea la particule între care acţionau forţe simple dependente numai de distanţă. El a încercat să-şi salveze, un timp cît mai îndelungat, convingerea că va izbuti să explice toate evenimentele din natură exclusiv cu aceste concepte fundamentale ale realităţii. Dificultăţile provocate de deviaţia acului magnetic şi cele legate de structura eterului ne-au obligat să creăm o realitate mai subtilă. Astfel s-a născut importanta invenţie a cîmpului electromagnetic. A fost necesară o imaginaţie ştiinţifică îndrăzneaţă pentru a se-zisa faptul că nu comportarea corpurilor ci comportarea a ceva ce se află între ele, adică a cîmpului, este esenţială pentru ordonarea şi înţelegerea evenimentelor.
Evoluţia ulterioară a distrus vechile concepte şi a creat altele noi. Timpul absolut şi sistemul de coordo

nate inerţial au fost părăsite de teoria relativităţii. Fondul pe care se desfăşoară toate evenimentele a încetat astfel să fie timpul unidimensional şi continuumul tridimensional al spaţiului, locul lor luîndu-1 continuumul cua-dridimensional spaţiu-timp, o altă invenţie liberă, cu noi proprietăţi de transformare. Sistemul inerţial de coordonate a încetat să fie necesar. Orice sistem de coordonate a devenit deopotrivă de adecuat pentru descrierea evenimentelor din natură.
Teoria cuantelor a creat, de asemenea, aspecte noi şi esenţiale ale realităţii noastre ; discontinuitatea a luat locul continuităţii. în locul legilor care guvernează indivizii au apărut legi de probabilitate.
Chiar dacă realitatea creată de fizica modernă este departe de realitatea începuturilor, obiectivul ei, ca de altfel al oricărei teorii fizice, rămîne totdeauna acelaşi.
Cu ajutorul teoriilor fizice încercăm să ne croim o potecă prin labirintul faptelor observate, să ordonăm şi să înţelegem lumea impresiilor noastre sensibile. Faptele observate căutăm să le deducem în mod logic din conceptul nostru de realitate. Dar fără convingerea că este posibilă redarea realităţii cu construcţiile noastre teoretice, fără credinţa în armonia interioară a lumii noastre, nu ar putea exista ştiinţă. Această credinţă este şi va rămîne pentru totdeauna motorul fundamental al oricărei creaţii ştiinţifice. De-a lungul tuturor eforturilor noastre, în fiedare luptă dramatică între concepţiile vechi şi cele noi, recunoaştem acelaşi îndemn nestăvilit spre cunoaştere, aceeaşi credinţă neclintită în armonia lumii noastre, întărită din ce în ce mai mult de obstacolele tot mai mari, care se ridică în calea înţelegerii.
Rezumăm :

Varietatea faptelor din domeniul fenomenelor atomice ne constrînge să inventăm încă o dată noi concepte fizice. Materia are o structură granulară ; ea este compusă din particule elementare, din cuante elementare de materie. Prin urmare, sarcina electrică are o structură granulară şi, faptul cel mai important din punctul de vedere ai teoriei cuantelor este că această structură o are şi
Teoria luantelor
235
energia. Fotonii smt cuantele de energie din care este compusă lumina.
Lumina este o undă sau o ploaie de fotoni? Un fascicul de electroni este o ploaie de particule elementare sau o undă? Aceste întrebări fundamentale sînt impuîse fizicienilor de către experienţa. Căutînd un răspuns la a-ceste întrebări, trebuie să abandonăm descrierea evenimentelor atomice ca petrecindu-se în spaţiu şi timp, fiind necesar să ne îndepărtăm şi mai mult de vechea concepţie mecanicistă. Fizica cuantică formulează legi care guvernează mulţimi, nu indivizi. Ea nu descrie proprietăţi ci probabilităţi; ea nu formulează* legi care să descrie viitorul sistemului ci legi care guvernează variaţiile în timp ale probabilităţilor şi care se referă la artsambluri mari de indivizi.
INDEX ALFABETIC
Aristotel 10
Baterie voltaică 69 Blanck 34, 35, 44 Bohr 212, 227 Brown 53
Caloric 37 Căldura 35, 36, 37
— ca substanţă 37
— specifică 36 Ceasornice sincronizate 144 Cîmp electromagnetic 114
— static 106 Constanta mişcării 43 Continuum bidimensional 159
— cuadridimensional 165
— tridimensional 160
— unidimensional 159 Coordonata punctului 127 Coordonate 122, 123 Copernic 122, 168
Corp de probă 99 Corpusculi de lumină 77 Coulomb 63, 68, 72, 106, 119, 189
Cuante de lumină 206
— energie 206
— elementare 199 Curbarea razelor de lumină
într-un cîmp gravitaţional puternic 190 Curent electric 69
— indus 108
Cristal 214
De Broglie 215, 219, 227 Dezintegrare radioactivă 15t>? 225
Democrit 47
Dezintegrarea radioactivă 156r 225
Difracţia luminii 99
— razelor X 213, 214, 230
— undelor electronice 220 Dipol electric 67
— magnetic 67 Dirac 227
Dispersia luminii 80
Echivalentul mecanic al căldurii 46
Ecuaţiile lui Maxwell 112 Efect fotoelectric 205 Electroni 201 Electroscop 57 Energie cinetică 42 —• mecanică 44
— potenţială 42
Eter 89, 93, 95—97, 130, 132,
133, 135 Experienţe cruciale 38
Faraday 98, 108, 110, 111 Fizeau 75, 76 Forţă 12
— şi materie 48 Fotoni 206 Fresnel 91
Index alfabetic
237
Galileu 9, 10, 11, 12, 15, 34
74, 122 Galvani 69
Heisenberg 227 Helmholtz 49 Hertz 98 Huygens 85
Imaginea dinamică a mişcării 163
— statică a mişcării 163 Invariantă, distanţa este 128 Izolatori 59
Joule 44, 45, 46
Leibniz 23

Linii de forţă ale cîmpului de gravitaţie 99
— (spectrale) 211 Legea de transformare 128
— gravitaţiei 28
— inerţiei 11 Lumina albă 79
—■ ca substanţă 76
— omogenă 80 Lungimea de undă 82, 90
Masa 30
— de repaus 154
— inertă 32
— gravifică 32
—■ unui atom de hidrogen
199, 202 --electron 202
— unei molecule de hidrogen 55, 199
— şi energie 157 Materie şi energie 46
--cîmp 192
Maxwell 98, 115 Mayer 43 Mercur 191
Metoda statistică 223—224
Michelşon 76
Michelson — Morley 138
Mişcare absolută uniformă 136
— browniană 53
— rectilinie 14
— uniformă relativă 136 Molecule 50
Montagnes russes 46—43
Newton 9, 11, 12, 13, 23, 28, 29, 63, 72, 78, 85, 90, 100, 106, 112, 115, 129, 134, 177, 188, 191, 195, 206
Nivel energetic 212
Noduri 216
Nucleu 203
Numărul de molecule într-un gram de hidrogen 55
Oersted 71, 73, 107, 110, 112, 114
Particule elementare 155 Planck 206 Pol magnetic 96, 100 Potenţial electric 64—65
Principia (Philosophiae naturalis principia mathematica) 13
Principiul relativităţii al lui Galileu 124
Propagarea rectilinie a luminii 76
Ptolemeu 168
Punct de vedere mecanicist 96, 118
Radiu 155
Raportul de transformare 43, 44
Raxe X 213, 214, 220 Relativitate generală 32, 170
— restrînsă 170 Reflexia luminii 78 Refracţia luminii 77 Reprezentarea prin cîmp 100
Romer 75, 76
Rowland 73, 100, 107, 114 Rumford 40, 44 Rutherford 204
238_Evoluţia
Sarcina electrică 64, 65 S. C. 123, 124 Schrodinger 215, 227 Sistem inerţial 125, 166
— local 173
— de referinţă 120, 123 Sodiu 80
Solenoid 103 Spectroscop 211 Spectru caracteristic 211
— continuu 210
— vizibil 80 Structură de cîmp 112, 114 Substanţă electrică 59
— fără greutate 37
Temperatură 34—35 Teoria cinetică a materiei 50, 56
— electromagnetică a luminii 118
— ondulatorie a luminii 85
fizicii
Thomson J. J. 201 Turmalină 93 Transformarea clasică 129 —! Lorentz 166
Undă 81

— de probabilitate 228
— electromagnetică 116
— longitudinală 83
— plană 85
— sferică 84
— staţionară 216
— transversală 84 Variaţia vitezei 13, 19, 22, 23
26
Vector viteză 21, 22 Viteza unei unde electromagnetice 117 Volta 69
Young 91
TABLA DE MATERII Pag.
Prefaţă .....* 5
I. ASCENSIUNEA CONCEPŢIEI MECANICISTE.....
§ 1. Marea poveste a tainelor naturii 7
§ 2. Prima idee conducătoare..... 9
§ 3. Vectorii I4
§ 4. Enigma mişcării..... 15
§ 5. încă o idee conducătoare 30
§ 6. Este căldura o substanţă ?..... 33
§ 7. Montagnes russes..... 40
§ 8. Raportul de transformare 43
§ 9. Concepţiile filosofice 47
§ 10. Teoria cinetică a materiei..... 50
II. DECLINUL CONCEPŢIEI MECANICISTE . . . . -57
§ 11. Cele două fluide electrice..... 57
§ 12. Fluidele magnetice..... 66
§ 13. Prima dificultate serioasă..... 65
£ 14. Viteza luminii 74
§ 15. Lumina ca substanţă..... 76
§ 16. Enigma culorii..... 78
§ 17. Ce este o undă ?..... 81
§ 18. Teoria ondulatorie a luminii..... 85
§ 19. Undele de lumină sînt longitudinale sau
transversale ? 93
§ 20. Eterul şi concepţia mecanicistă..... 95
III. CIMP, RELATIVITATE 98
§ 21. Cîmpul ca reprezentare.....98
§ 22. Cei doi stîlpi ai teoriei cîmpului 107
§ 23. Realitatea cîmpului.....112
§ 24. Cîmpul şi eterul.....117
§ 25. Sistem de referinţă.....120
§ 26. Eterul şi mişcarea.....130
§ 27. Durată, distanţă, relativitate.....143
§ 28. Relativitatea şi mecanica.....153
240
Evoluţia fizicii
Pag.
§ 29. Continuumul spaţiu-timp.....158
§ 30. Relativitatea generală.....166
§ 31. In exteriorul şi în interiorul unui ascensor . . 171
§ 32. Geometria şi experienţa.....177
§ 33. Relativitatea generală şi verificarea ei . 188
§ 34. Cîmp şi materie.....192
<V. TEORIA CUANTELOR 197
§ 35. Continuitate, discontinuitate.....197
§ 36. Cuante elementare de materie şi de electricitate . 199
§ 37. Cuante de lumină.....204
§ 38. Spectre luminoase 210
§ 39. Unde de materie.....214

§ 40. Unde de probabilitate 221
§ 41. Fizica şi realitatea..... . 232
Index alfabetic . . . . ' . • . . .237
Confruntarea traducerii : Prof. Dr. Plăcinţeanu I. I. Controlul ştiinţific al traducerii: Prof. Dr. Ing. Răduleţ Remus, membru coresp. al Ac. R.P.R.
Responsabil de carte : Rogai EJiferie Tehnoredactor : Bălăiţă Titel Corector responsabil: Ianculescu Măria
Dat la cules 20.09 J957. Bun de tipar 12.11.1957. Hîrtie semivelină de 65gjm^, 54x84/16. Coli editoriale 12,96. Coli de tipar 15,375. Planşe tipo 3. Comanda r u 3104 A. 7061 ;E 10925. Indicele de clasificare pentru bibliotecile mari şi mici 53.
Tiparul executat la întreprinderea Poligrafică ,,Apărarea Patriei" str. izvor 137, Bucureşti R P.R.
C. 1652
ERATĂ

Pag.	Rîndul	în loc de	Se va citi	Din vina
4	12 sus	Evolutions	Evolution	Editurii
14	9 sus	scadă	cadă	Editurii
39	23 sus	metalice des-prinse de bur-ghiu.	orele consacrate studiului	Tipografiei
95	2 sus	Acesta	Aceasta	Editurii
211	3 jos	diferite	definite	Tipografiei
236	4 sus	Blanck	Black	Tipografiei